4. RÉSZ Megszilárdult beton témaköre 4. RÉSZ

Betontörmelék és téglatörmelék újrahasznosítása beton-adalékanyagként *(2002. május)*

"Citonit" bauxitbeton *(2023. július)*

Fagyálló beton, fagy- és olvasztósó-álló beton. Fagyállóság és vizsgálat *(2010. július)*

Fiatal beton szilárdulási folyamata. Nurse-Saul-féle modell, Papadakis-Bresson-féle modell, de Vree-féle modell, CEMIJ-féle módszer, Arrhenius-féle modell, Szilárdulási idő tényező fogalma
Beton szakmai havilap, *(2010. decemberi, 2011. januári, februári, márciusi és júniusi szám)*
Vasbetonépítés folyóirat, *(2011. 2., 3. és 4. szám)*

Gázbeton (pórusbeton) fogalma *(2001. szeptember)*

Gázbeton-Pórusbeton. **Dieter Hums** 1987. és 1990. években, az Építőanyag folyóiratban megjelent két cikke: "YTONG gázbeton előállítása, tulajdonságai és alkalmazása" és "Homokalapú gázbetonok szilárdsági, hőtechnikai, akusztikai, építésbiológiai tulajdonságai" *(2010. december)* **Lásd: PÁLYATÁRSAK-írásai.**

Habbeton, habcement fogalma *(2002. július)*

Könnyűbeton fogalma *(2002. október)* **A pályatársaknak az ankéton elhangzott előadásait lásd: PÁLYATÁRSAK-írásai.**

Könnyűbetonok (nagyon könnyűek) alkalmazásának elmélete és gyakorlata. Az SZTE Beton Szakosztályának ankétja 2009. november 24-én *(2009. november)*

Betontörmelék és téglatörmelék újrahasznosítása beton-adalékanyagként

TANULMÁNY

Bevezetés

A II. világháború előtt és közvetlenül azután épült régi ipari épületek egy része napjainkra korszerűtlenné vált, elvesztette funkcióját. Le kell azokat bontani, hogy új épületeknek adhassák át a helyüket. A keletkező bontási hulladék elszállítása és elhelyezése gondot okoz. Környezetvédelmi szempontból is célszerű a bontott építőanyagokat fajtánként elkülöníteni, és arra alkalmas hányadukat előkészítés után újrahasznosítani. Az újrahasznosítható bontott anyagok egyike a beton- és vasbetonszerkezetek törmeléke, amelyből a betonacél eltávolítása után, töréssel és osztályozással beton-adalékanyagot lehet előállítani. A bontás során, számos helyen téglatörmelék keletkezik, amiből leginkább könnyűbeton készíthető.

A bontott anyag előkészítése újrahasznosításra kezdetben talán legelőnyösebben mobil berendezéssel és ott valósítható meg, ahol a bontást és építést egyazon vállalkozó végzi, mert ebben az esetben az újrahasznosított beton a bontás helyén az új építménybe be is építhető. Később várható, hogy a piacon megjelennek gyártók, akik kifejezetten újrahasznosított betont forgalmaznak, és ilyen termékekkel kereskednek. Ennek feltétele, hogy az újrahasznosított betonból készülő termék nem csak a minőséget, hanem az eladási árat tekintve is versenyképes legyen a hagyományos termékek piacán.

A bontott anyagok beton-adalékanyagkénti alkalmazásának az MSZ EN 206-1:2002 európai beton szabvány azáltal enged teret, hogy az adalékanyag fogalmát a 3.1.24. fejezetben így határozza meg: "Betonhoz alkalmazható, szemcsés ásványi anyag. Az adalékanyagok lehetnek természetesek, mesterségesek vagy korábbi szerkezetekből újra hasznosított anyagok."

2001-2003. években az ÉPÜLETFENNTARTÁSI K+F Alapítvány megbízásából, illetve az OKTATÁSI MINISZTÉRIUM Országos Műszaki Fejlesztési Bizottságának, majd a KÖRNYEZETVÉDELMI ÉS VÍZÜGYI MINISZTÉRIUM Hulladékgazdálkodási és Technológiai Főosztályának támogatásával foglalkoztunk az építési törmelékek kisméretű (kézi), előregyártott betonelemek adalékanyagaként való hasznosításának feltételeivel. A kutatás-fejlesztési téma kidolgozásában közreműködött a KISS és TÁRSA Budafoki Építőipari és Szolgáltató Kft. és a CEMKUT Cementipari Kutató-Fejlesztő Kft. Betonlaboratóriuma.

Honlapunknak ezen az oldalán ennek a munkának az eredményeiről számolunk be, különös tekintettel a betontörmelékkel, és érintőlegesen a téglatörmelékkel szerzett tapasztalatokra.

Kutatási eredményeink beépültek a *fib* (Nemzetközi Betonszövetség) Magyar Tagozata által kiadott „Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával” című, BV-MI 01:2005 (H) jelű Beton- és Vasbetonépítési Műszaki Irányelvbe.

Kísérleti betontörmelék adalékanyagú betonelemek tervezése

A kísérleti gyártmánytervezéshez meg kellett határozni a betonelemek előállításához szükséges beton nyomószilárdsági osztályokat és a 28 napos próbakockák nyomószilárdságának megkövetelt átlagértékeit, amelyek számításaink szerint a következők:

1. táblázat:

Betonelem	Beton minőségi jel az MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint	Végig víz alatt tárolt, 150 mm méretű, 28 napos beton próbakockák megkövetelt átlagos nyomószilárdsága, ($f_{cm,cube,\ 28}$), N/mm^2
• Kétrétegű, mosott felületű járdalap hátbetonja • Zsaluzóelem • Üreges főfal-falazóelem Nyomószilárdság legalább 2,5 N/mm^2	C12/15 - 16/S1	20,4
• Üreges pince-falazóelem Nyomószilárdság legalább 4,5 N/mm^2 • Üreges födémbéléstest Hajlító-törőerő legalább 5 kN	C16/20 - 8/S1	26,3
• Normál kivitelű járdalap Hajlító-húzószilárdság legalább 2 N/mm^2 • Normál kivitelű útszegélyelem	C16/20 - 16/S1	26,3

• Egyrétegű, mosott felületű járdalap Hajlító-húzószilárdság legalább 2 N/mm^2 • Gyephézagos járdalap Hajlító-húzószilárdság legalább 2 N/mm^2 • Mederlap Hajlító-húzószilárdság legalább 2 N/mm^2 • "K" szegélykő • Hálósvasalású surrantóelem	C20/25 - 16/S1	31,6
• Kétrétegű útburkolóelem hátbetonja	C25/30 - 16/S1	36,8
• Kétrétegű, mosott felületű járdalap kopórétege	C25/30 - 24/S1	36,8
• Fokozottan kopásálló és időálló útszegélyelem	C30/37 - 24/S1	44,2
• Egyrétegű útburkolóelem • Kétrétegű útburkolóelem kopórétege	C35/45 - 24/S1	52,6

Megjegyzés:

1. A próbakockák nyomószilárdságának megkövetelt átlagértékeit C12/15 nyomószilárdsági osztály esetén 2,75 N/mm^2 értékű, e fölött 3,00 N/mm^2 értékű szórással számítottuk.

2. A végig vízben tárolt (MSZ EN 206-1:2002) próbatestek 28 napos nyomószilárdsága 0,92-szorosa a vegyesen tárolt (MSZ 4719:1982) próbatestek nyomószilárdságának.

3. Megjegyzés: "S" a roskadási osztály betűjele az MSZ EN 206-1:2002 európai szabvány szerint. Az "S1" roskadási mérték (10-40 mm) az MSZ 4714-3:1986 szerinti földnedves konzisztenciánál kissé nedvesebb (alig KK) illetve a kissé képlékeny (KK) konzisztenciának felel meg. Az "S1" roskadási mérték nem más, mint a DIN 1045:1988 szerinti "steifer Beton" (merev beton) "KS" jelű konzisztenciája.

A betontörmelék kőzetfizikai tulajdonságai

A bontásból származó törmelékek önszilárdsága közel sem akkora és nem is olyan egyenletes, mint a hazai homokok és kavicsok önszilárdsága, és olyan változatosságot mutat, mint amilyen változatos a zúzottkövek szilárdsága, vagy akár a kőanyagok szilárdsága, amelyek egy adott bányán belül is eltérhetnek egymástól. Ez az eltérés a kőzetfizikai tulajdonságokkal írható le.

Magyarországon a zúzottköveket anyagtani tulajdonságaik alapján kőzetfizikai csoportokba soroljuk (MSZ 18291:1978 illetve ÚT 2-3.601:1998). A következő táblázatban az elterjedten alkalmazott ÚT 2-3.601:1998 útügyi műszaki előírás követelményeit mutatjuk be, annak utólagos megjegyzésével, hogy a kőzetfizikai csoportok két betűvel („AA”, „BB”, „CC”, „DD”) való jelölése 2005. év végén megszűnt, és az ÚT 2-3.601:2005 útügyi műszaki előírás alapján az új jelölés 2006. január 1. óta egy betűvel („A”, „B”, „C”, „D”) történik.

2. táblázat:

Szem-nagyság	Kőzetfizikai tulajdonságok	Kőzetfizikai csoport			
		“AA”	“BB”	“CC”	“DD”
		Követelményértékek tömegszázalékban			
		-ig	felett -ig	felett -ig	felett -ig
3 - 80	Los Angeles aprózódás	20	20 - 25	25 - 35	35 - 45
12 - 55	Deval aprózódás, vizes eljárás				
	20-55 mm	8,5	8,5 - 11,2	11,2 - 15,9	15,9 - 30,3
	12-20 mm	5,7	5,7 - 7,7	7,7 – 11,0	11,0 - 23,7
3 - 12	Mikro-Deval aprózódás, vizes eljárás	15	15 - 20	20 - 25	25 - 30
2 - 80	Szulfátos kristályosítási aprózódás, $MgSO_4$ oldatban	10	10 - 15	15 - 20	20 - 30

Az alábbi vizsgálati eredményeink szerint a betontörmelék minősége általában csak a “CC” - “DD” kőzetfizikai csoportot éri el:

3. táblázat:

Betontörmelék kőzetfizikai tulajdonságai	Vizsgálati eredmény	Betontörmelék minősítése zúzottkőként	
		MSZ 18291 szerint	ÚT 2-3.601 szerint
Testsűrűség, kg/m^3	1980 - 2270	Kis testsűrűségű anyag	
Halmazsűrűség, kg/m^3	1090 – 1370	Kis halmazsűrűségű anyag	
Hézagtérfogat, térfogat%	36,9 – 51,4	Közepes hézagtérfogatú anyag	
Mértékadó vízfelvétel, tömeg%			
0,05 órás vízfelvétel 1 órás vízfelvétel 96 órás vízfelvétel	0,9 – 5,6 4,6 – 19,1 5,2 – 19,8	Nagy vízfelvételű anyag	
0-4 mm törmelék 0,02 mm alatti finomszem tartalma, térfogat%	11,4	MSZ 18293 szerint “S”	“UZ”
Szemalak, lemezes szemek mennyisége, tömeg%			
4-8 mm törmelék 8-16 mm törmelék 16-24 mm törmelék	31,7 16,4 13,9	“NZ” “KZ” “KZ”	“UTZ” “UTZK” “UTZK”
4 mm alatti törmelék szemalakja, tölcséres kifolyási szám, s/dm^3			
1-2 mm törmelék 2-4 mm törmelék	13,93 19,10	Nincs követelmény	Nincs követelmény
Los-Angeles aprózódás, tömeg%			
5-8 mm 8-12 mm 12-20 mm 20-35 mm szemnagyság esetén	33,0 - 35,9 34,0 - 37,2 34,5 - 40,2 33,6 - 34,1	“C” - “D” “C” - “D” “C” - “D” “C”	“CC” - “DD” “CC” - “DD” “CC” - “DD” “CC”

Deval aprózódás, 20-32 mm szemnagyság esetén, tömeg%			
száraz vizsgálat	11,1	“D”	Nincs követelmény
vizes vizsgálat	19,1	“D”	“DD”
Mikro-Deval aprózódás, száraz vizsgálat, tömeg%			
4-8 mm 8-16 mm szemnagyság esetén	7,8 - 19,0 17,0	Nincs követelmény	Nincs követelmény
Mikro-Deval aprózódás, vizes vizsgálat, tömeg%			
4-8 mm 8-16 mm szemnagyság esetén	12,4 - 34,9 19,6	Nincs követelmény	“AA” - XX “BB”
Szulfátos kristályosítási aprózódás 4-8 mm szemnagyság esetén, tömeg%			
Nátrium-szulfát oldatban	14,0	“B”	Nincs követelmény
Magnézium-szulfát oldatban	29,0	“C”	“DD”
Tervezhető mértékadó kőzetfizikai csoport Tervezhető mértékadó termékosztály		“D” “NZ”*	“DD” “UTZK”**

Megjegyzés:

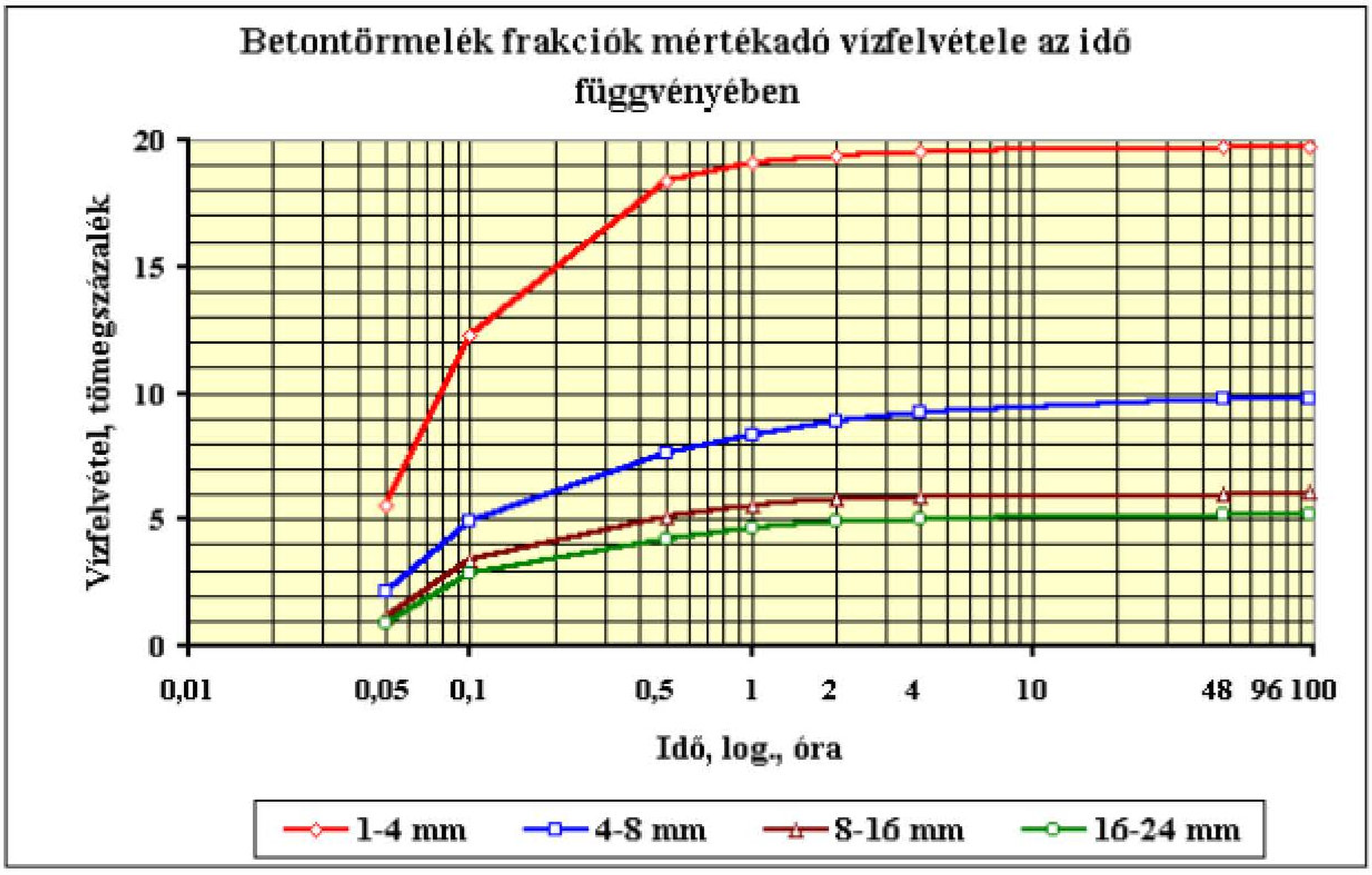
XX: Kőzetfizikai csoportba nem sorolható.

* “NZ”: Nemes zúzottkő

** “UTZK”: Egyedileg tervezett szemmegoszlású zúzottkavics, csak a mára (2006.) érvényét vesztett ÚT 2-3.601:1998 útügyi műszaki előírásban.

A betontörmelék vízfelvétele is eltér a homokos kavicsétól, annál nagyobb:

1. ábra:



A betontörmelék adalékanyagú beton tervezése

Az újrahasznosított beton összetételét tehát annak figyelembevételével kell megtervezni, hogy a betontörmelék önszilárdsága, szemalakja, felületi érdessége, vízfelvétele eltér a homokos kavics hasonló tulajdonságaitól és inkább a zúzottkő tulajdonságaihoz hasonlít.

Tapasztalatunk szerint a "DD" kőzetfizikai csoportú adalékanyaggal készített beton nyomószilárdsági osztálya egy fokozattal gyengébb, mint az "AA" kőzetfizikai csoportú adalékanyaggal készített betoné. Ezért kell az újrahasznosított betont a betontörmelék kőzetfizikai csoportja függvényében nagyobb nyomószilárdságúra tervezni, mint amennyi a kavicsbeton, illetve az azzal egyenértékűnek tekintett "AA" kőzetfizikai csoportú zúzottkő adalékanyaggal készített beton számított átlagos nyomószilárdsági követelménye.

Ez azt jelenti, hogy a betontörmelék adalékanyagú beton nyomószilárdságának tervezési értékét úgy lehet megkapni, hogy a beton nyomószilárdsági osztályából számított átlagos nyomószilárdságot a ζ szorzóval meg kell szorozni:

$$f_{cm,\,cube,\,28,\,Recyclingbeton} = \zeta^{*}\, f_{cm,\,cube,\,28}$$

A ζ szorzó a beton-nyomószilárdsági osztály és a betontörmelék mértékadó kőzetfizikai csoportja függvényét képezi.

A ζ szorzó függvényét az $f_{ck,cube}$ küszöbérték függvényében a "D" illetve "DD" kőzetfizikai csoport esetére írtuk fel:

$$\zeta_{D,\ DD} = 1{,}7343 - 0{,}1477 * \ln(f_{ck,cube})$$

Magyarázat: A ζ regressziós függvény elfogadható közelítéssel az egymást követő nyomószilárdsági osztályok $f_{ck,cube}$ minősítési értékei hányadosaira (például: 45/37=1,22 37/30=1,23; 30/25=1,20; 25/20=1,25; 20/15=1,33) illeszkedik, tehát "D" vagy "DD" kőzetfizikai csoportú zúzottkő adalékanyag esetén a ténylegesnél eggyel nagyobb nyomószilárdsági osztályra tervezünk.

A többi kőzetfizikai csoporthoz tartozó ζ szorzó értékét az "A" illetve "AA" és a "D" illetve "DD" kőzetfizikai csoportok ζ értékei közé való lineáris interpolálással határoztuk meg:

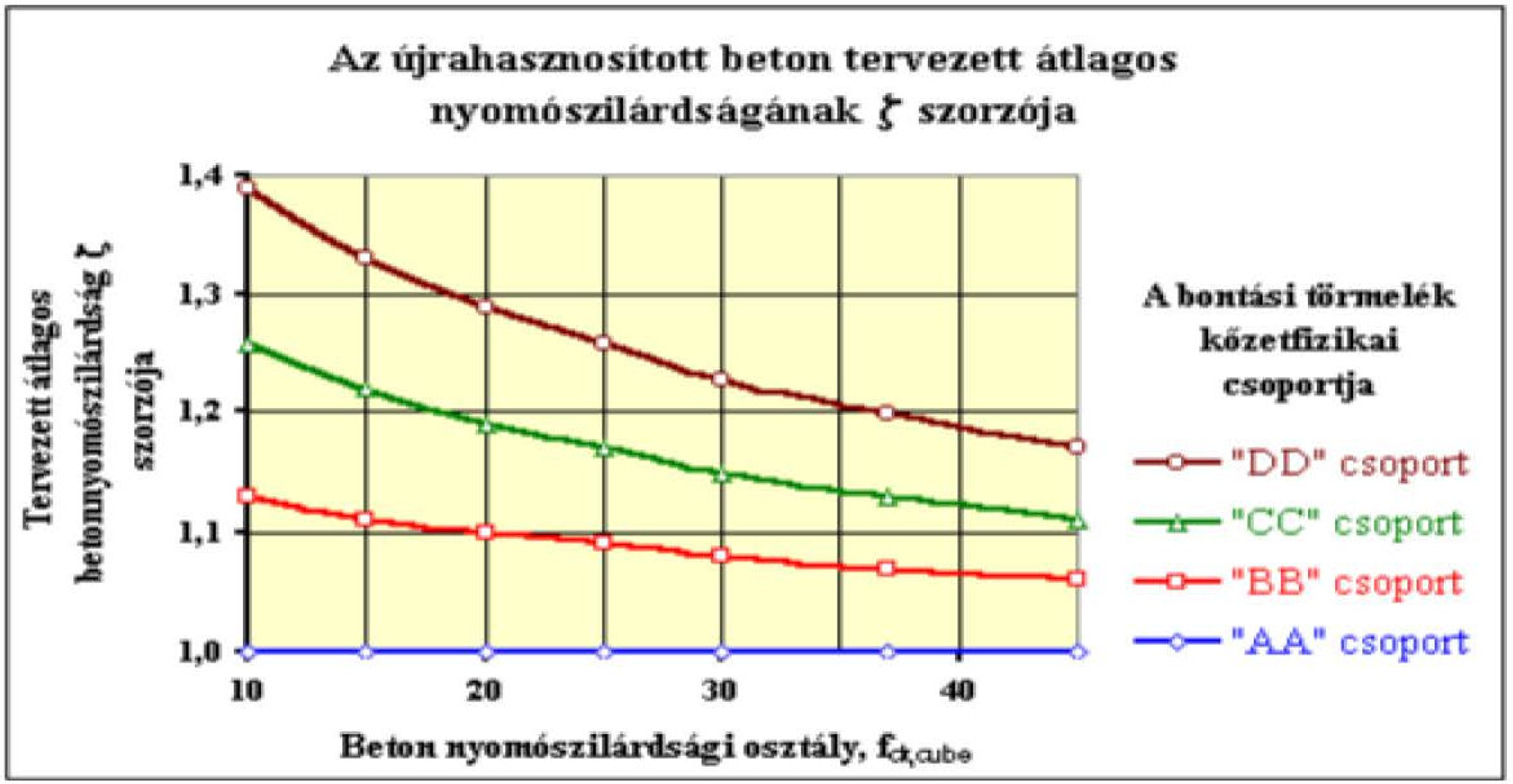
4. táblázat:

Beton nyomó-szilárdsági osztály az MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint $f_{ck,cyl/cube}$	A **ζ szorzó**, ha a betontörmelék mértékadó kőzetfizikai csoportja			
	"A" ill. "AA"	"B" ill. "BB"	"C" ill. "CC"	"D" ill. "DD"
C12/15	1,00	1,11	1,22	1,33
C16/20	1,00	1,10	1,19	1,29
C20/25	1,00	1,09	1,17	1,26
C25/30	1,00	1,08	1,15	1,23
C30/37	1,00	1,07	1,13	1,20
C35/45	1,00	1,06	1,11	1,17

Például, ha a C16/20 nyomószilárdsági osztályú beton betontörmelék adalékanyaga "B" illetve "BB" kőzetfizikai csoportú, akkor ahhoz, hogy a beton próbatestek elérjék az $f_{cm,cube} = R_{m150,nom} = 26{,}3\ N/mm^2$ nyomószilárdsági átlag értéket (lásd 1.

táblázat), a betont $R_{m150,nom}' = \zeta * R_{m150,nom} = 1{,}10 * 26{,}3 = 28{,}9$ N/mm^2 átlagos nyomószilárdságra kell tervezni.

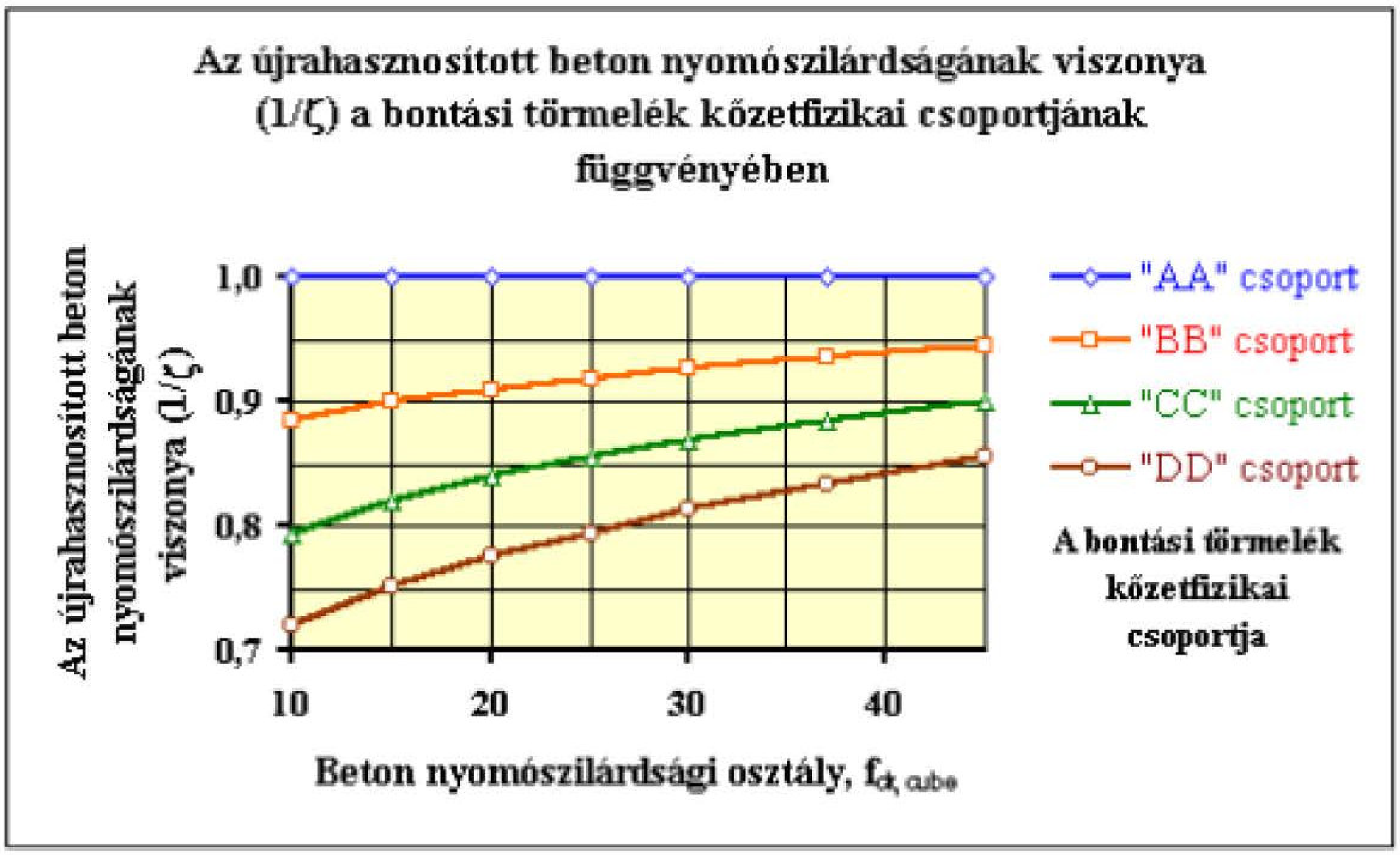
2. ábra:



Azt is mondhatjuk, hogy az újrahasznosított beton nyomószilárdsága a betontörmelék adalékanyag kőzetfizikai csoportjának függvénye, aminek mértékét az $1/\zeta$ viszonyszám fejezi ki:

$$1/\zeta = \frac{f_{ck,\,Recyclingbeton,ii-kőzetfizikai\ csoport}}{f_{ck,\,Recyclingbeton,AA-kőzetfizikai\ csoport}}$$

3. ábra:



Az újrahasznosított beton összetételét a zúzottkőbeton tervezésére érvényes Bolomey-Palotás-féle képletek felhasználásával határozzuk meg. A betontörmelék adalékanyagú beton víz-cementtényezőjét (x) a nyomószilárdság tervezési értékéből ($f_{cm,\ cube,\ 28,\ Recyclingbeton}$) és a cementminőségből számítjuk ki a próbakocka méret-tényezőjének ($\gamma = 0{,}94$) figyelembevételével. Majd a víz-cementtényező (x), a konzisztencia, betontörmelék adalékanyag legnagyobb szemnagysága (d_{max}) és szemeloszlásának finomsági modulusa (m), valamint a környezeti feltételek függvényében meghatározzuk a cementtartalmat (c):

$$x = f(f_{cm,\ cube,\ 28,\ Recyclingbeton},\ CEM,\ \gamma)$$

$$c = f(x,\ konzisztencia,\ d_{max},\ m,\ környezeti\ feltételek)$$

A vízadagolást, tekintettel a betontörmelék jelentős vízfelvételére, meg kell növelni a rövididejű (például 0,05 vagy 0,10 órás) vízfelszívás értékével. Ez a vízfelszívás akár 35-60 kg/betonköbméter értéket is kitehet, miáltal a vízadagolás az eredetinek 20-35 %-ával megnő.

A kisebb cementtartalmú újrahasznosított betonok esetén előfordulhat, hogy a beton finomrész hiányos. A hiányzó finom szemeket 0/1 mm szemnagyságú, gömbölyű szemalakú bányahomokkal kell pótolni, ami további vízkorrekciót vonhat maga után.

A betontörmelék vízfelszívása, szemalakja, érdessége, az esetleges többlethomok adagolás megnehezítheti az újrahasznosított beton bedolgozását. Ilyenkor a bedolgozhatóság javítására célszerű folyósító adalékszert használni, és/vagy például a 4 mm alatti betontörmelék szemek mennyiségének felét, esetleg kétharmadát gömbölyű szemalakú bányahomokra cserélni.

Ezeknek a meggondolásoknak az alapján megterveztük az újrahasznosított betonból készülő kísérleti betonelemek betonösszetételét. Az újrahasznosított betonok konzisztenciáját, testsűrűségét, nyomószilárdságát laboratóriumi vizsgálatokkal ellenőriztük.

Betonelemek gyártása betontörmelék adalékanyagú betonnal

A kísérleti, 100%-ban újrahasznosított betontörmelék adalékanyaggal készített betonelemeket egy egyébként szokványos kavicsbetonokkal dolgozó, ELBA EMM 10/15 típusú keverőgéppel, megfelelő sablonokkal, asztalvibrátorral és kézi vibropréssel rendelkező, szabadtéri betontelepen kézi módszerrel gyártottuk le. A betonelemeket 3 napon keresztül gyenge vízsugárral utókezeltük.

A betonelemgyártás sikeres volt, a kísérleti termékek állékonysága, testsűrűsége, szilárdsága, tartóssága minden követelménynek megfelelt. A gyakorlat az elméleti betontervezési elképzelések helyességét igazolta.

Fel kell azonban a figyelmet hívni arra, hogy bár a kísérleti betonelem gyártás sikeres volt, a betonösszetétel javítására, a finomrész tartalom beállítására, a cementadagolás esetleges csökkentésének lehetőségére, a betonstruktúra termék-specifikus kialakítására a bedolgozhatóságot és az állékonyságot is tekintetbe véve, még további kísérleteket kell végezni.

Ha ide kattint, akkor a kísérlet során készített fényképeket tekintheti meg.

Betontörmelék beton-adalékanyagként újrahasznosítás céljára

Betonbruch zur Wiederverwendung als Betonzuschlagstoff

Feldolgozatlan betontörmelék
Betonbruch vor der Vorbereitung

Anlage für Vorbereitung des Betonbruchs zur Wiederverwendung als Betonzuschlagsstoff

Berendezés betontörmelék előállítására bontott vasbetonból, beton-adalékanyag céljára

Betonösszetétel ellenőrzése laboratóriumban

Rezeptkontrolle im Laboratorium

Újrahasznosított betonkeverék
Rezyklierte Betonmischung

Herstellung der Verschalungsblocksteine

Osztott zsaluzóelemek készítése

Herstellung der Verschalungsblocksteine

Osztott zsaluzóelemek készítése

Herstellung der Flußbettplatten

Mederlapok készítése

Útszegélyelemek készítése

Normál zsaluzóelemek készítése kézi vibropréssel
Herstellung der Verschalungsblocksteine mit Handvibropresse

Frische Verschalungsblocksteine

Frissen kizsaluzott, kísérleti, osztott zsaluzóelemek (50*20*25 cm)
betontörmelék adalékanyagú betonból

'01 08 21

Frische Gehsteigplatten

Frissen kizsaluzott, kísérleti járdalapok (40*40*6 cm)
betontörmelék adalékanyagú betonból

'01 08 21

Frische Verschalungsblocksteine

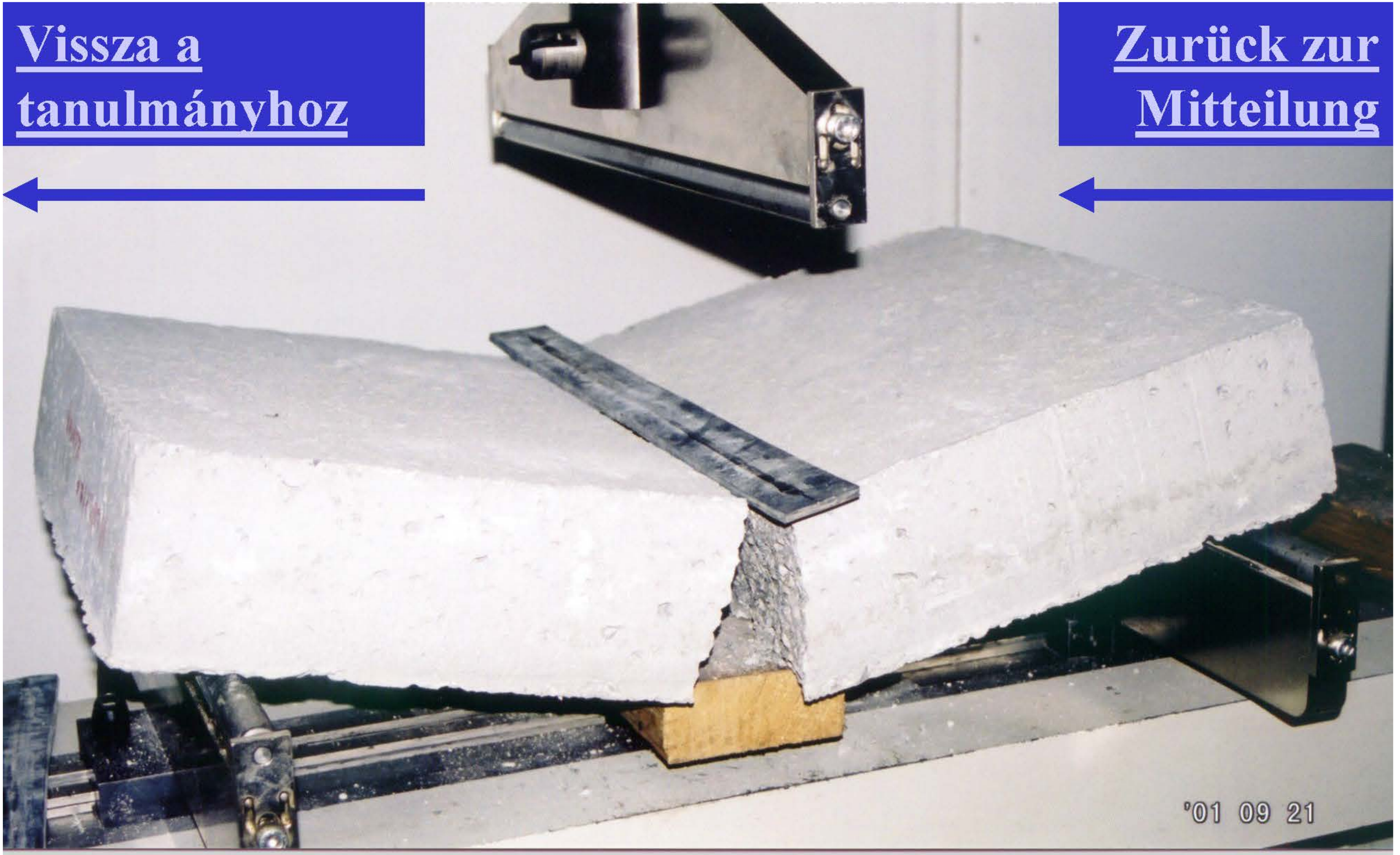
Kézi működtetésű vibropréssel gyártott, betontörmelék adalékanyagú, kísérleti, normál zsaluzóelemek (50*20*25 cm), friss állapotban

Osztott zsaluzóelem nyomó vizsgálata

Druckversuch des Verschalungsblocksteins

Vissza a tanulmányhoz

Zurück zur Mitteilung



Mederlap hajlító vizsgálata
Biegeversuch der Flußbettplatte

Tapasztalat téglatörmelék adalékanyagú betonnal

A téglatörmelék tulajdonságai a betontörmelékétől több vonatkozásban is különböznek.

A téglatörmelék jelentős mennyiségű vakoló és falazó habarcsot tartalmaz, azaz vegyes összetételű, ami hozzájárul ahhoz, hogy a téglatörmelék testsűrűsége és halmazsűrűsége a betontörmelékénél kisebb, több finomszemet tartalmaz, szemalakja lemezesebb, vízfelvétele igen nagy, önszilárdsága csekély, és ezért kőzetfizikai csoportba nem sorolható:

5. táblázat:

Minőségi jellemző	**Mért érték**	**Téglatörmelék minősítése**	
		MSZ 18291	ÚT 2-3.601
		szerint	
Téglatörmelék			
Testsűrűség, kg/m^3	1950 - 2150	Kis testsűrűségű anyag	
Halmazsűrűség, kg/m^3	980 – 1250	Kis halmazsűrűségű anyag	
Hézagtérfogat, térfogat%	38,3 – 54,1	Közepes hézagtérfogatú anyag	
Mértékadó vízfelvétel, tömeg%			
0,05 órás vízlelvétel 1 órás vízfelvétel 96 órás vízfelvétel	3,1 – 6,4 17,0 – 23,4 18,7 – 25,0	Igen nagy vízfelvételű anyag	
0-4 mm törmelék 0,02 mm alatti finomszem tartalma, térfogat%	13,1	MSZ 18293 szerint “S”	“UZ”
Szemalak, lemezes szemek mennyisége, tömeg%			
4-8 mm törmelék 8-16 mm törmelék 16-24 mm törmelék	62,8 53,5 48,7	“Z” “NZ” “NZ”	“UZ” “UTZ” “UTZ”
4 mm alatti törmelék szemalakja, tölcséres kifolyási szám, s/dm^3			
1-2 mm törmelék 2-4 mm törmelék	17,06 29,89	Nincs követelmény	Nincs követelmény
4-8 mm törmelék mikro-Deval aprózódása, tömeg%	száraz: 22,85 vizes: 67,40	Kőzetfizikai csoportba nem sorolható	
Hummel aprózódás, szétmorzsolódási tényező		Nincs követelmény, az ajánlott érték:	
5-8 mm törmelék 16-32 mm törmelék	1,44 2,55	≤ 1,0 ≤ 1,4	
20-32 mm törmelék Deval aprózódása, tömeg%	száraz: 19,42 vizes: 31,81	Kőzetfizikai csoportba nem sorolható	

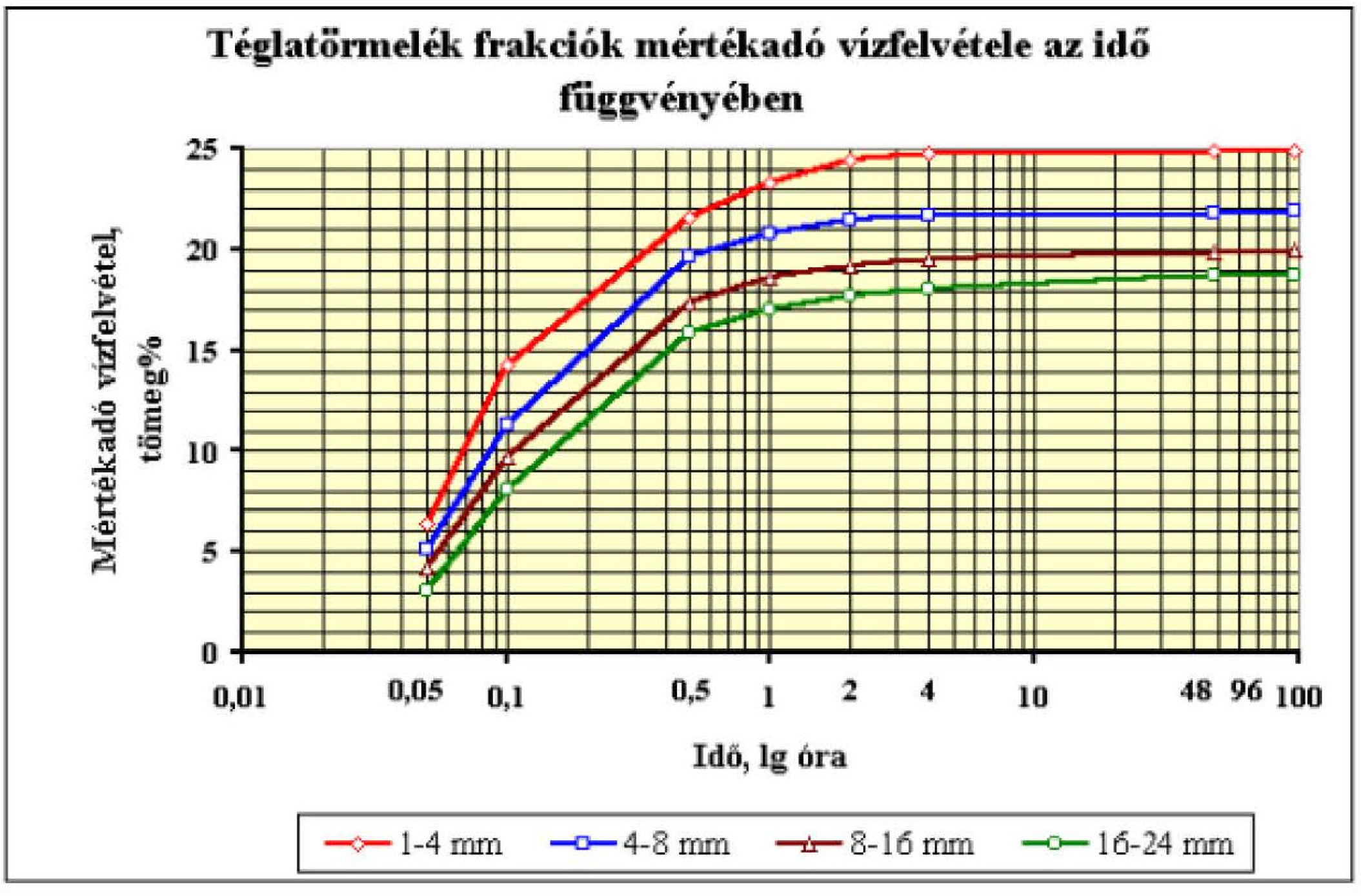
4-8 mm törmelék kristályosítási aprózódása, tömeg%			
Nátrium-szulfát-oldatban	19,63	“C”	Nincs követelmény
Magnézium-szulfát-oldatban	37,91	“D”	Kőzetfizikai csoportba nem sorolható
Tervezhető mértékadó kőzetfizikai csoport		Kőzetfizikai csoportba nem sorolható	Kőzetfizikai csoportba nem sorolható
Tervezhető mértékadó termékosztály		“Z”*	“UTZ”**

Megjegyzés:

* “Z”: Zúzottkő

** “UTZ”: Egyedileg tervezett szemmegoszlású zúzottkő, csak a mára (2006.) érvényét vesztett ÚT 2-3.601:1998 útügyi műszaki előírásban.

4. ábra:



A téglatörmelék nem sorolható kőzetfizikai csoportba, ezért a téglatörmelék adalékanyagú könnyűbeton nyomószilárdságának tervezési értékét úgy lehet megkapni, hogy a könnyűbeton nyomószilárdsági osztályából számított átlagos nyomószilárdságot az η szorzóval meg kell szorozni:

$$f_{cm,\,cube,\,28,\,Recyclingbeton} = \eta^{*} f_{cm,\,cube,\,28}$$

Az η szorzó javaslatunk szerint a könnyűbeton nyomószilárdsági osztályának függvényét képezi:

6. táblázat:

Könnyűbeton nyomószilárdsági osztály az MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint $f_{ck,cyl/cube}$	Az **η szorzó** értéke
LC8/9	1,52
LC12/13	1,44
LC16/18	1,39

A téglatörmelék adalékanyaggal készített könnyűbetonból a következő könnyűbeton-elemeket lehet gyártani:

7. táblázat:

Könnyűbeton-elem	Könnyűbeton minőségi jel az MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint	Végig víz alatt tárolt, 150 mm méretű, 28 napos könnyűbeton próbakockák megkövetelt átlagos nyomószilárdsága, ($f_{cm,cube,28}$), N/mm^2
• Kézi, tömör falazóelem Nyomószilárdság legalább 2 N/mm^2	LC8/9 - 8/FN D 1,8 * LC8/9 - 24/FN D 2,0 **	13,5

• Üreges főfal-falazóelem • Hőszigetelő falazóelem • Zsaluzóelem Nyomószilárdság legalább 2,5 N/mm^2	LC12/13 - 8/FN D 2,0	18,8
• Üreges pince-falazóelem Nyomószilárdság legalább 4,5 N/mm^2	LC16/18 - 8/FN D 2,0	24,1
• Üreges válaszfallap Hajlító-törőerő legalább 4,5 kN	LC12/13 - 8/FN D 2,0	18,8
Egyedi méretezés alapján: • Nagyobb falvastagságú könnyűbeton-elemek • Monolit könnyűbetonok	LC8/9 - 24/FN D 2,0 LC12/13 - 24/FN D 2,0 LC16/18 - 24/FN D 2,0	13,5 18,8 24,1

Megjegyzés:

1. A próbakockák nyomószilárdságának megkövetelt átlagértékeit C8/10 nyomószilárdsági osztály esetén 2,50 N/mm^2 értékű, C12/15 nyomószilárdsági osztály esetén 2,75 N/mm^2 értékű, C16/18 nyomószilárdsági osztály esetén 3,00 N/mm^2 értékű szórással számítottuk.

2. A végig vízben tárolt (MSZ EN 206-1:2002) próbatestek 28 napos nyomószilárdsága 0,92-szorosa a vegyesen tárolt (MSZ 4719:1982) próbatestek nyomószilárdságának.

* D 1,8: A könnyűbeton testsűrűsége megszilárdult és kiszárított állapotban 1600 - 1800 kg/m^3.

** D 2,0: A könnyűbeton testsűrűsége megszilárdult és kiszárított állapotban 1800 - 2000 kg/m^3.

Irodalom

1. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DafStb-Richtlinie: Beton mit rezykliertem Zuschlag. Ausgabe August 1998. Vertrieb durch Beuth Verlag GmbH Berlin.

2. Sufang Lü: Schubtragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen. DafStb Heft 504. Vertrieb durch Beuth Verlag GmbH Berlin, 2000.

3. Meißner, Matthias: Biegetragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen. DafStb Heft 505. Vertrieb durch Beuth Verlag GmbH Berlin, 2000.

4. Müller, Christoph - Dora, Bernd: Verwertung von Brechsand aus Bauschutt. DafStb Heft 506. Vertrieb durch Beuth Verlag GmbH Berlin, 2000.

5. Zilch, Konrad - Roos, Frank: Betonkennwerte für die Bemessung und das Verbundverhalten von Beton mit rezykliertem Zuschlag. DafStb Heft 507. Vertrieb durch Beuth Verlag GmbH Berlin, 2000.

6. Wörner, Johann-Dietrich - Moerland, Pieter - Giebenhain, Sabine - Kloft, Harald - Leiblein, Klaus: Zulässige Toleranzen für die Abweichungen der mechanischen Kennwerte von Beton mit rezykliertem Zuschlag. DafStb Heft 508. Vertrieb durch Beuth Verlag GmbH Berlin, 2000.

7. Haase, Rosemarie: Anwendungsbereich der DIN 4226-100:2001 "Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel. Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen". Betonwerk + Fertigteil-Technik. Jg. 67. 2001. No. 12. p. 64-66.

8. Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe: Richtlinie für Recycling-Baustoffe aus Hochbau-Restmassen. Anwendungsbereich: Zementgebundene Massen. Stand Mai 1995. Wien.

9. Pankhardt Kinga: Az újrahasznosított adalékanyagú betonok. Beton szakmai havilap. I. rész: 2000. március. p. 3-7.; II. rész: 2000. április. p. 3-7.; III. rész: 2000. május. p. 3-5.

AJÁNLÁS

A.1. Alkalmazás

Az ajánlás a bontási betontörmelékek és téglatörmelékek - MSZ 4719:1982 és MSZ EN 206-1:2002 szerinti betonoknak megfelelő minőségben készített - vasalatlan előregyártott betonelemek adalékanyagakénti alkalmazásával foglalkozik.

A.2. Fogalmak

Mértékadó víztartalom a bontási adalékanyag víztartalma a betonba való keverést közvetlenül megelőző pillanatban.

Mértékadó vízfelvétel a kiszárított állapotú bontási adalékanyag vízfelvételének és mértékadó víztartalmának különbsége.

Rövid idejű mértékadó vízfelvétel a mértékadó vízfelvételnek az a része, amely a víznek a mértékadó víztartalmú adalékanyaghoz való hozzáadásától a beton bedolgozásáig tartó időre esik.

Keverővíz az alap keverővíz és a többlet keverővíz összege. Az **alap keverővíz** értékét a tervezett víz-cementtényező és a cementadagolás szorzata adja meg. A **többlet keverővíz** a bontási adalékanyag rövid idejű mértékadó vízfelvételének (nulla és 1 közé eső tömegarány) és a mértékadó víztartalmú adalékanyag tömegének szorzata.

Mértékadó kőzetfizikai csoport a bontott adalékanyag különböző tulajdonságok alapján meghatározott, MSZ 18291:1978 illetve ÚT 2-3.601:1998 szerinti kőzetfizikai csoportjai közül a leggyengébb.

A.3. Betontervezés

A betontervezés módszere szabadon megválasztható, de eredményét laboratóriumi kísérlettel ellenőrizni kell. Célszerű a zúzottkövekre kidolgozott tervezési módszert alkalmazni.

Megjegyzés: Az építmények bontásból származó tört, osztályozott adalékanyag - főképpen a betontörmelék, - önszilárdságának változatossága, szemalakja, felületi érdessége, vízfelvétele folytán sokkal jobban hasonlít a zúzottkőhöz, mint a kavicshoz, illetve homokos kavicshoz. Minthogy kifejezetten az újrahasznosított adalékanyaggal készülő betonok tervezésére kidolgozott nemzeti vagy európai szabvány, vagy műszaki irányelv nincs, és erre vonatkozó módszer sem ismeretes, ezért a betontörmelék adalékanyagú betonok tervezését lényegében a Bolomey-Palotás-féle betontervezési képletek alkalmazásával, a zúzottkőbetonok tervezési módszere szerint ajánlott elvégezni. Újrahasznosított téglatörmelék esetén könnyűbeton tervezési módszerek is alkalmazhatók.

A betonelem típusok gyártásához szükséges beton (vagy könnyűbeton) összetételét úgy kell megtervezni, hogy a beton minősége és a 150 mm méretű, a kizsaluzástól a szilárdság vizsgálatig végig vízben tárolt próbakockán, 28 napos korban mért átlagos nyomószilárdsága ($f_{cm,cube,28}$) a betonelem típustól függően a tanulmány 1. és 7. táblázata szerinti értékeket elérje.

Ha az adalékanyag olyan betontörmelék, amely nem az "A" (MSZ 18291:1978) illetve az "AA" (ÚT 2-3.601:1998) kőzetfizikai csoportba tartozik, akkor a betontörmelék kőzetfizikai csoportja szerint a betont nagyobb nyomószilárdságúra kell tervezni, mint amennyi a tanulmány 1. táblázat szerinti számított, átlagos nyomószilárdsági követelmény.

A betontörmelék adalékanyagú beton nyomószilárdságának tervezési értékét úgy kapjuk meg, hogy a beton nyomószilárdsági osztályából számított átlagos

nyomószilárdságot a betontörmelék mértékadó kőzetfizikai csoportja függvényét képező ζ szorzóval (Tanulmány 4. táblázat) megszorozzuk.

A következő táblázatban ajánlást adunk a betontörmelék adalékanyagkénti alkalmazására:

A beton nyomó-szilárdsági osztálya víz alatti tárolás esetén az MSZ EN 206-1:2002 szerint $f_{ck,cyl/cube}$	Ajánlás a betontörmelék adalékanyagkénti alkalmazására az MSZ 18291:1978 és az ÚT 2-3.601:1998 szerinti mértékadó kőzetfizikai csoportja függvényében			
	"A" ill. "AA"	"B" ill. "BB"	"C" ill. "CC"	"D" ill. "DD"
C12/15	•	•	•	••
C16/20	•	•	•	••
C20/25	•	•	••	••
C25/30	•	•	••	••
C30/37	•	••	••	x
C35/45	•	••	••	x

Jelmagyarázat:

• Korlátozás nélkül alkalmazható.

•• Alkalmazása akkor ajánlott, ha a bontott törmelék részaránya az adalékanyagban ≤ 30 tömeg%.

x Alkalmazása nem ajánlott.

Az ajánlástól beton kísérleti eredmények alapján el lehet térni, ha a beton magasabb minőségi osztályúnak bizonyul, mint a tervezett minőségi osztály.

A téglatörmelék adalékanyagú könnyűbeton nyomószilárdságának tervezési értékét úgy kapjuk meg, hogy a beton nyomószilárdsági osztályából számított átlagos nyomószilárdságot az η szorzóval (Tanulmány 6. táblázat) megszorozzuk.

A bontott építési törmelék mértékadó rövid idejű (például 5 vagy 10 perces, a bedolgozásig szükséges idő figyelembevételével) vízfelvétele jelentősen

meghaladja a kavicsok és zúzottkövek vízfelvételét, amit a tervezés során a vízadagolás meghatározásánál figyelembe kell venni. A vízadagolás a víz-cementtényező és a cementtartalom szorzatából adódó érték (alap keverővíz = $m_{víz,1}$) és a mértékadó rövid idejű vízfelvételből számított érték (többlet keverővíz = $m_{víz,2}$) összege.

A.4. Alapanyagok tulajdonságai

A.4.1. Cement

A termékek gyártásához csak az MSZ EN 197-1:2000 harmonizált európai szabványnak megfelelő CEM I 42,5 jelű portlandcementet vagy CEM II/A 32,5 jelű összetett portlandcementet szabad használni.

A.4.2. Bontott adalékanyag

Az adalékanyagul olyan bontási anyagot kell használni, amelyből az idegen anyagokat (például betonacélt) eltávolították. Az építőanyag-nemenként elkülönített bontási anyagot megfelelő szemnagyságúra kell törni, és frakciókra kell osztályozni.

A bontott építési törmelék fizikai, mechanikai és kémiai tulajdonságait meg kell vizsgálni, és adalékanyagként akkor alkalmazható, ha minősége megfelel a követelményeknek. Az A.6. fejezetben felsorolt vizsgálati módszerek és követelmények figyelembe veszik, hogy a bontott törmelék tulajdonságai elsősorban a zúzottkőéhez hasonlítanak.

Ha a bontott anyag minősége betonkészítés céljára nem megfelelő, akkor természetes adalékanyaggal szabad javítani, és a javított adalékanyag keverék tulajdonságait kell megvizsgálni. A vizsgálati jegyzőkönyvben, ha lehetséges, fel kell tüntetni a bontott anyag származását és bontás előtti minőségét, valamint az esetleges javító adalékanyag jellemzőit és a keverési arányt.

A bontott törmelék kőzetfizikai csoportba sorolását célszerű szerkezeti betonelem (például zsaluzóelem, pincefalazó elem, födémbéléstest, stb.) adalékanyag esetén az MSZ 18291:1978 szabvány szerint, forgalom hatásának kitett betonelem (például járdalap, útszegélyelem, stb.) adalékanyag esetén az ÚT 2-3.601:1998 (ÚT 2-3.601:2005) útügyi műszaki előírás szerint végezni.

A téglatörmeléket a könnyűbeton-adalékanyagok vizsgálati módszereinek eredményeivel is jellemezni kell.

Felhasználás előtt meg kell határozni az adalékanyag rövid idejű mértékadó vízfelvételét.

Az osztályozott, bontási adalékanyagot frakciónként és mérlegelve kell a betonkeverőgépbe juttatni.

A.4.3. Természetes adalékanyag

A bontott adalékanyag tulajdonságainak javítására lehet természetes adalékanyagot használni. A természetes adalékanyag homok, homokos kavics, kavics esetén feleljen meg az MSZ 18293:1979 szabványnak, zúzottkő esetén az MSZ 18291:1978 szabványnak vagy az ÚT 2-3.601:1998 útügyi műszaki előírásnak.

A.4.4. Keverővíz

A termékek készítéséhez olyan víz használható fel, amelynek minősége a betongyártáshoz általában használt víz minőségétől nem tér el. A víz minőségére vonatkozó követelményeket a MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás 3.3. fejezete tárgyalja.

A beton keverővizét két részből összetettként (alap és többlet keverővíz) kell kiszámítani. A beton-keverőgépbe adagolandó keverővíz az alap és a többlet keverővíz összege. A többlet keverővíz mennyiségét gyártási műszakonként és a műszakon belül a mértékadó víztartalom változása esetén kell meghatározni.

A.4.5. Adalékszer

Az adalékszer (például képlékenyítőszer, légbuborékképzőszer, stb.) akkor használható, ha annak minőségét az adalékszer forgalmazója tanúsítja és a termékhez használati utasítást mellékel. A beton adalékszerekre vonatkozó minőségi követelmények a MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás 3.4. fejezetében találhatók.

Az adalékszert erős felmelegedéstől, fagytól óvva kell tárolni.

A.5. Betonok és betontermékek tulajdonságai

A.5.1. Betonösszetétel

A beton összetételét a termék jellemzőinek és az alapanyagok minőségének, különösen a bontott adalékanyag tulajdonságainak megfelelően, az A.3. fejezet szerint kell megtervezni.

A megtervezett betonösszetételt termelésbevétel előtt laboratóriumi vizsgálattal ellenőrizni, és szükség esetén módosítani kell. A gyártásra jóváhagyott betonösszetétel keverővizét az adalékanyag víztartalmi állapotának megfelelően műszakonként, a műszak kezdete előtt, és szükség esetén műszak közben is meg kell határozni.

A.5.2. Friss beton

A friss beton konzisztenciáját az MSZ 4714-3:1986 (MSZ EN 12350-2:2000) szerint roskadás méréssel, az idő függvényében kell vizsgálni.

A konzisztencia mérést a beton megkeverésétől számított 5 perc múlva, és 45 perc múlva, illetve a beton bedolgozása előtt 10 perccel meg kell elvégezni. A beton jelében szereplő konzisztencia mérték a bedolgozáskori konzisztenciára vonatkozik.

A betont akkor szabad bedolgozni, ha a konzisztenciája megfelel a tervezett konzisztenciának, a kellő tömörítést lehetővé teszi, és a friss termék állékonyságát nem veszélyezteti. A meg nem felelő konzisztenciájú betonkeverék összetételét cement, adalékanyag, vagy víz hozzákeverésével javítani, új keverék készítéséhez felhasználni nem szabad, hanem újra kell keverni. Az új keveréket a konzisztencia mérésnél tapasztaltak alapján, ha a meg nem felelő betonkeverék képlékeny volt, akkor a vízadagolás csökkentésével, vagy ha száraz volt, akkor lehetőleg többlet víz hozzáadása nélkül, képlékenyítőszerrel kell beállítani. Képlékenyítőszer használata egyébként is ajánlott.

Az előregyártott betonelemek készítéséhez általában földnedves vagy kissé képlékeny konzisztenciájú betont kell készíteni.

A friss beton légpórustartalmának meghatározása hasznos lehet, légbuborékképző adalékszer használata esetén pedig szükséges.

A.5.3. Beton próbatest

A megkevert friss betonból heti gyakorisággal, beton-összetételenként legalább három darab, nem egy keverésből vett, MSZ EN 206-1:2002 európai szabvány szerinti Φ150*150 mm méretű próbahengert vagy 150 mm méretű próbakockát kell készíteni a beton minőségének vizsgálatára. A beton próbatestet 1 napos koráig sablonban, nedves környezetben kell tartani, majd 1 napos korban ki kell zsaluzni, és a szilárdság vizsgálat időpontjáig végig víz alatt kell tárolni.

Vizsgálandó a beton próbatest testsűrűsége friss állapotban és 28 napos korban, valamint a nyomószilárdság 28 napos korban, és ha szükséges 7 napos korban.

A.5.4. Friss betontermék

A friss betonterméket készítésétől legalább három napos koráig vízpermetezéssel utókezelni kell.

A.5.5. Megszilárdult betontermék

A megszilárdult betontermék minőségét a vonatkozó termékszabvány előírásai szerint 28 napos korban kell meghatározni. A vizsgálatoknak értelemszerűen ki kell terjednie a termék méretére, felületeinek, éleinek, sarkainak ép voltára, tömegére, szilárdságára, időjárásnak kitett termékek esetén a fagyállóságra, a forgalomnak kitett termékek esetén, ha szükséges a kopásállóságra és az olvasztósó-állóságra.

A.6. Követelmények és vizsgálatok

Az anyagokkal szemben támasztott követelményeket, a követelmények vizsgálati módszerének szabvány számát, a vizsgálatok megkövetelt gyakoriságát a következő táblázatban tüntettük fel. A vizsgálatokat az anyagok illetve tulajdonságaik változása esetén a táblázatban feltüntetett gyakoriságtól függetlenül a változás észlelését követően el kell végezni.

Jel	Anyag és tulajdonság	Követelmény	Vizsgálat	Vizsgálat gyakorisága anyag fajtánként, legalább
Cement				
1.	Cement szabványos minőségét meghatározó tulajdonságok	MSZ EN 197-1 szerinti CEM I 42,5 pc vagy CEM II/A 32,5 összetett pc	MSZ EN 196-1 MSZ EN 196-3	Gyártónként három havonta
Bontott adalékanyag				
A vizsgálati anyag mintavételét az MSZ 18282-1 szabvány szerint kell végezni.				
2.	Egyneműség*	Idegen anyag* ≤ 0,5 m% Idegen anyag** ≤ 2,0 m%	Szemrevételezés	Műszakonként
3.	Testsűrűség	≥ 1800 kg/m^3	MSZ 18284-2	Havonta, és betontervezés előtt
	Halmazsűrűség	≥ 900 kg/m^3		

4.	Vízfelvétel	≤ 25 m%		MSZ 18284-3	Hetente, és betontervezés előtt
5.	Rövid idejű mértékadó vízfelvétel, 10 perc alatt	4 mm alatt	4 mm felett	MSZ 18284-3	Műszakonként
		≤ 20 m%	≤ 15 m%		
6.	0,02 mm alatti szemek mennyisége a 4 mm alatti frakcióban	≤ 15 v%		MSZ 18288-2 szerinti ülepítéssel	Műszakonként
7.	Szemmegoszlás	MSZ 18291 szerinti NZ osztály	ÚT 2-3.601 szerinti UNZ osztály	MSZ 18288-1 szerinti száraz szitálás	Műszakonként
	Adalékanyag keverék finomsági modulusának számítása a szemmegoszlás vizsgálat eredményéből	A finomsági modulus az MSZ 18293 szerinti szélső határgörbék finomsági modulusa közé kell, hogy essék.		Szemmegoszlás vizsgálat alapján, MSZ 18288-5 szerint, 0,063 mm-es kezdő szitanyílással	Az adalékanyag keverék összetételének vagy a frakciók szemmegoszlásának változása esetén
8.	Szemalak	MSZ 18291 szerinti NZ osztály	ÚT 2-3.601 szerinti UNZ osztály	MSZ 18288-3 szerint, 4 mm felett v/s=0,5 tengelyaránnyal, 4 mm alatt “B” jelű tölcsérrel	Hetente
9.	Mikro-Deval aprózódás, betontöret esetén	ÚT 2-3.601 szerinti, legalább “DD” kőzetfizikai csoport		MSZ 18287-6	Három havonta, és betontervezés előtt

10.	Los Angeles aprózódás, betontöret esetén	MSZ 18291 szerinti, legalább “D” kőzetfiz. csoport	ÚT 2-3.601 szerinti, legalább “DD” kőzetfiz. csoport	MSZ 18287-1	Három havonta, és betontervezés előtt
11.	Deval aprózódás, betontöret esetén	MSZ 18291 szerinti, legalább “D” kőzetfiz. csoport	ÚT 2-3.601 szerinti, legalább “DD” kőzetfiz. csoport	MSZ 18287-2	Három havonta, és betontervezés előtt
12.	Szulfátos kristályosítási aprózódás, betontöret esetén	MSZ 18291 szerinti, legalább “D” kőzetfiz. csoport	ÚT 2-3.601 szerinti, legalább “DD” kőzetfiz. csoport	MSZ 18289-3 magnézium-szulfát-oldatban vizsgálva	Három havonta, és betontervezés előtt
13.	Hummel-féle szétmorzsolódási tényező, téglatöret esetén	≤ 1,5		MSZ 18287-3	Három havonta, és betontervezés előtt
14.	Oldható szulfát-tartalom SO_4-ben kifejezve	≤ 0,1 m%		MSZ 18288-4	Szállítmányonként
15.	Oldható klorid-tartalom Cl-ban kifejezve	≤ 0,02 m%		MSZ 18288-4	Szállítmányonként
16.	Agyagrög-tartalom	≤ 1 m%		Szemrevételezés	Szállítmányonként

Természetes adalékanyag					
17.	Szabványos jellemzők ellenőrzése	Homok és kavics esetén MSZ 18291 szerinti, legalább P-TT minőségű, osztályozott termék	Zúzottkő esetén ÚT 2-3.601 szerinti, legalább DD-UNZ minőség	Az MSZ 18291 szabványban és az ÚT 2.3.601 műszaki előírásban megadott, termék minősítő vizsgálati módszerek	Szállítmányonként
Keverővíz					
18.	Eredet és állapot, hidrogénion-koncentráció, szulfát-, klorid-, szervesanyag-, lebegőanyag-tartalom	Általában csapvizet kell használni. A víz nem lehet gyógyvíz, ásványvíz, talajvíz, kellemetlen szagú, színezett, zavaros, habzó, pezsgő víz.	MÉASZ ME 04-19:1995 műszaki előírás 3.3. fejezete szerint	Szemrevételezés műszakonként, laboratóriumi vizsgálat a gyártótelep létesítésekor, és szükség esetén, ha a szemrevételezés indokolja	
Adalékszer					
19.	Állapot, szavatossági idő	Állapota meg kell, hogy egyezzen a termék-ismertetőben megadott külső jellemzőkkel. Szavatossági ideje érvényben kell, hogy legyen.	MÉASZ ME 04-19:1995 műszaki előírás 3.4. fejezete szerint	Szemrevételezés használatba vétel során, a minőséget illető gyanú esetén szakintézeti laboratóriumi vizsgálat szükséges.	
Friss beton					
20.	Roskadási mérték	≤ 20 mm	MSZ 4714-3	Minden betonösszetételre nézve, egyszer műszakonként	

Beton próbatest				
Beton-összetételenként hetente három darab MSZ EN 206-1:2002 szerinti próbatestet kell készíteni. A beton próbatesteknek külön keverésekből kell származniuk				
21.	Testsűrűség a friss beton bedolgozott állapotában, és a megszilárdult, vízzel telített betonon (nyomószilárdság vizsgálat előtt) mérve, tömör beton-struktúra esetén	*Betontörmelék adalékanyag esetén a* friss beton testsűrűsége legalább 2050 kg/m^3, a megszilárdult, vízzel telített betoné legalább 2200 kg/m^3	MSZ 4714-2	Próbatestek készítése, illetve nyomószilárdság vizsgálata alkalmával
		Téglatörmelék adalékanyag esetén a friss beton testsűrűsége legalább 1775 kg/m^3, a megszilárdult, vízzel telített betoné legalább 1925 kg/m^3		
22.	Nyomószilárdság	Az ajánlás A.3. fejezete szerint	MSZ 4715-4	Beton-összetételenként hetente, a beton 28 napos, és ha szükséges 7 napos korában
Megszilárdult beton- és könnyűbeton termék, például				
23.	Méretfelvétel, a felületek, élek, sarkok vizsgálata, tömegmérés	Vonatkozó termék-szabvány, illetve műszaki leírás szerint	Vonatkozó termékszabvány, illetve műszaki leírás szerint	Műszakonként és termék fajtánként
24.	Termék nyomószilárdsága, legalább, átlag (egyedi legkisebb)			
	Főfal-falazóelem Zsaluzóelem Pincefalazó elem	2,5 (2,0) N/mm^2 3,0 (2,5) N/mm^2 4,5 (3,5) N/mm^2	MSZ 11405-3 MSZ 11405-6 MSZ 11405-4	10.000 db-onként
25.	Termék hajlító-törőereje, legalább, átlag (egyedi legkisebb)			
	Födémbéléstest EB 60/19	5000 (3500) N	MSZ 10798-2	10.000 db-onként
	Válaszfallap	4500 (4000) N	MSZ 11405-5	

26.	Termékből kifúrt vagy kivágott próbatest nyomószilárdsági osztálya			
	Útszegélyelem, normál	C16/20	MSZ 1999	10.000 db-onként
	“K”-szegélykő	C20/25	MSZ 1999	
	Surrantóelem	C20/25	-	
	Útszegélyelem, extra	C30/37	-	
	Útburkolóelem	C35/45	MSZ 4751	Két hetente
27.	Termék hajlító-húzószilárdsága, legalább			
	Járdalap I., II., III. oszt.	2,0 1,8 1,6 N/mm^2	MSZ 4755-2, -4	10.000 db-onként
	Mederlap	2,0 N/mm^2	-	
28.	Fagyállóság			
	Főfalfalazóelem	15 ciklus	MSZ 11405-3	10.000 db-onként
	Zsaluzóelem	15 ciklus	MSZ 11405-6	10.000 db-onként
	Pincefalazó elem	15 ciklus	MSZ 11405-4	10.000 db-onként
	Útszegélyelem, normál	25 ciklus	MSZ 1999	10.000 db-onként
	“K”-szegélykő	25 ciklus	MSZ 1999	10.000 db-onként
	Surrantóelem	50 ciklus	-	20.000 db-onként
	Útszegélyelem, extra	50 ciklus	-	20.000 db-onként
	Útburkolóelem	50 ciklus	MSZ 4751	Két hetente
	Járdalap	25 ciklus	MSZ 4755-2, -4	10.000 db-onként
	Mederlap	50 ciklus	-	20.000 db-onként
29.	Kopásállóság			
	Útszegélyelem, normál	k 12/18	MSZ 1999	10.000 db-onként
	“K”-szegélykő	k 12/18	MSZ 1999	10.000 db-onként
	Útburkolóelem	k 14/21	MSZ 4751	Külön igény esetén

	Útszegélyelem, extra	k 10/15	-	20.000 db-onként

Megjegyzés: Az egyneműség szempontjából * típusú idegen anyagok: gipsz, fa, növény, szigetelőanyag, papír, textil, gumi, műanyag, üveg, fém; ** típusú idegen anyagok: sejtbeton, könnyűbeton, aszfalt.

A.7. Minőségügyi feltételek

A.7.1. Műszaki dokumentum

A termékgyártás műszaki és minőségügyi feltételeit a termékszabvány illetve a műszaki irányelv [Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával. Beton- és Vasbetonépítési Műszaki Irányelv. BV-MI 01:2005 (H), *fib* (Nemzetközi Betonszövetség) Magyar Tagozata] tartalmazza.

A.7.2. Minőségügyi napló

A minőséggel kapcsolatos eseményekről, az anyag és termék vizsgálatok eredményeiről naplót kell vezetni és a naplót meg kell őrizni. A naplóba a minőségért felelős vezető és az üzem vezetője tehet bejegyzést.

A.7.3. Megfelelőség tanúsítás

Az épített környezet védelmében kiadott 1/1995. (II.24.) KTM rendelet, illetve az építési termékek műszaki követelményeinek, megfelelőség igazolásának, valamint forgalomba hozatalának és felhasználásának részletes szabályairól szóló, 2002. évi rendelet-tervezet szerint tanúsítani kell, hogy az építési tevékenység során beépített anyagok, épületszerkezeti elemek minősége az építési célnak megfelelnek.

"Forgalomba hozni vagy beépíteni csak megfelelőség igazolással rendelkező, építési célra alkalmas építési terméket lehet."

A.7.4. Termék jelölése

A bontott építési törmelék adalékanyaggal készített termék megkülönböztetése a természetes adalékanyagú termékektől a termelési naplóból visszakereshető számjelzéssel történhet. A betonelem termék szállítólevelén nem szükséges az egyébként szokásostól eltérő, az adalékanyagra utaló megnevezést alkalmazni, vagy megjegyzést feltüntetni. Ha az építési törmelékkel e műszaki előírás szerint készített betonból - mint transzportbetonból - más felhasználónál készül a betonelem, akkor a transzportbeton szállítólevelére rá kell vezetni, hogy az csak vasalatlan betonelemek készítésére alkalmas.

Hivatkozott szabványok, műszaki előírások és műszaki irányelv

MSZ 1999:1983	Előregyártott beton útszegélyelemek
MSZ 4714-2:1986	A betonkeverék és a friss beton vizsgálata. A betonalkotók mennyiségének, a beton testsűrűségének és légpórustartalmának meghatározása
MSZ 4714-3:1986	A betonkeverék és a friss beton vizsgálata. A konzisztencia meghatározása
MSZ 4715-4:1987	A megszilárdult beton vizsgálata. Mechanikai tulajdonságok roncsolásos vizsgálata
MSZ 4719:1982	Betonok
MSZ 4751:1991	Beton útburkoló elemek
MSZ 4755-2:1991	Beton járdalapok. Normálkivitelű járdalapok
MSZ 4755-4:1991	Beton járdalapok. Gyephézagos járdalapok
MSZ 10798-2:1989	Üreges beton födémbéléstestek. EB jelű födémbéléstestek
MSZ 11405-3:1992	Leier-építőelemek. Főfalfalazó elemek
MSZ 11405-4:1992	Leier-építőelemek. Pincefalazó elemek
MSZ 11405-6:1992	Leier-építőelemek. Zsaluzóelemek
MSZ 18282-1:1987	Építési kőanyagok mintavétele és vizsgálati rendszere. Termékek mintavétele és minősítése
MSZ 18284-2:1979	Építési kőanyagok tömegösszetételi vizsgálatai. Sűrűségi jellemzők vizsgálatai
MSZ 18284-3:1979	Építési kőanyagok tömegösszetételi vizsgálatai. Víztartalmi jellemzők vizsgálata
MSZ 18287-1:1990	Építési kőanyagok szilárdságvizsgálata próbahalmazon. Los Angeles-vizsgálat
MSZ 18287-2:1983	Építési kőanyagok szilárdságvizsgálata próbahalmazon. Deval-vizsgálat
MSZ 18287-3:1983	Építési kőanyagok szilárdságvizsgálata próbahalmazon. Hummel-vizsgálat
MSZ 18287-6:1984	Építési kőanyagok szilárdságvizsgálata próbahalmazon. Mikro-Deval-vizsgálat

MSZ 18288-1:1991	Építési kőanyagok szemszerkezeti és szennyeződési vizsgálata. A szemmegoszlás vizsgálata szitálással
MSZ 18288-2:1984	Építési kőanyagok szemszerkezeti és szennyeződési vizsgálata. Szemmegoszlás vizsgálata ülepítéssel
MSZ 18288-3:1978	Építési kőanyagok szemszerkezeti és szennyeződési vizsgálata. Szemalak vizsgálata
MSZ 18288-4:1984	Építési kőanyagok szemszerkezeti és szennyeződési vizsgálata. A vegyi szennyeződés vizsgálata
MSZ 18288-5:1981	Építési kőanyagok szemszerkezeti és szennyeződési vizsgálata. Szemmegoszlásjellemzők számítása
MSZ 18291:1978	Zúzottkő
MSZ 18293:1979	Homok, homokos kavics és kavics
MSZ EN 196-1:1996	Cementvizsgálati módszerek. A szilárdság meghatározása
MSZ EN 196-3:1990	Cementvizsgálati módszerek. A kötési idő és a térfogatállandóság meghatározása
MSZ EN 197-1:2000	Cement. Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei
MSZ ENV 206:2000	Beton. Tulajdonságok, előállítás, bedolgozás és megfelelőségi követelmények
MSZ EN 206-1:2002	Beton. Feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség
MSZ EN 12350-2:2000	A friss beton vizsgálata. Roskadásvizsgálat
MSZ EN 45014:1990	Gyártók megfelelőségi nyilatkozatának általános feltételei
MÉASZ ME-04.19:1995	Beton és vasbeton készítése. Műszaki előírás
ÚT 2-3.601:1998	Útépítési zúzott kőanyagok. Útügyi műszaki előírás
ÚT 2-3.601:2005	Útépítési zúzottkövek és zúzottkavicsok. Útügyi műszaki előírás
MSZ EN 206-1:2002	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség
BV-MI 01:2005 (H)	Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával. Beton- és Vasbetonépítési Műszaki Irányelv. *fib* (Nemzetközi Betonszövetség) Magyar Tagozata

A bauxitbeton felülvizsgálata során talált „Citonit” födémekről

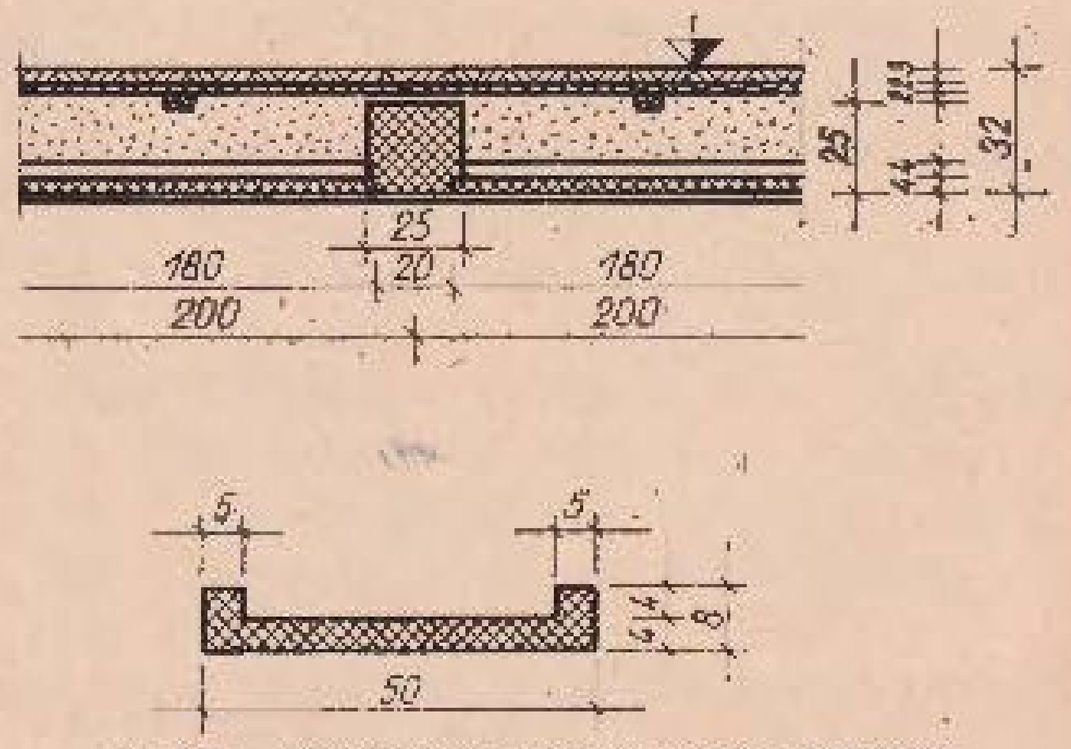
KAMSAY TIBOR
Szilikátipari Központi Kutató- és Tervező Intézet, Budapest

Építőanyag. 1970. 8. szám

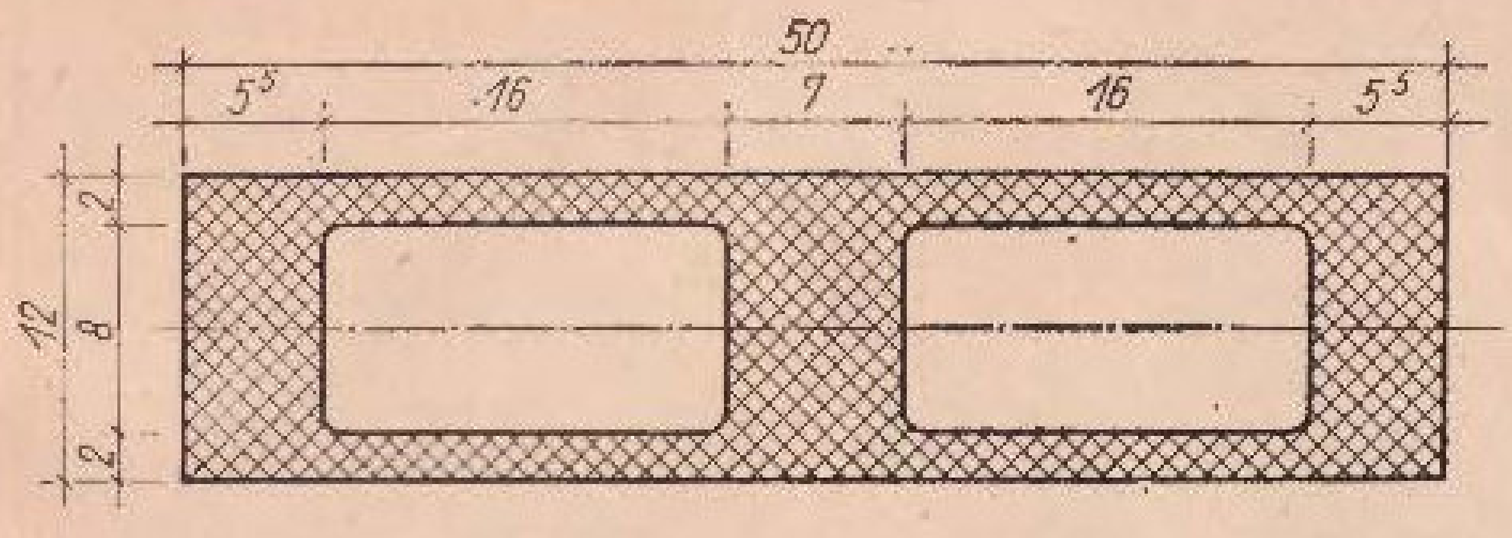
A bauxitcement felhasználásával készült épületek állékonyságának a 6/1967 ÉVM számú körrendelet alapján történt felülvizsgálata során a födémszerkezetekre — az alulról végzett roncsolásmentes vizsgálat bizonytalansága, valamint a födémek többnyire veszélytelen állapota miatt — a többi épületszerkezethez képest kevesebb figyelmet fordítottunk. Ezért nem kis meglepetést és gondot okozott az a „Citonit” födémmel készült négy budapesti lakóépület, amelynek felülvizsgálatát intézetünk végezte.

A „Citonit” bauxitbeton födémmel először egy 1930-ban épült, 4364 légm³-es, ötszintes, 20 lakásos, mészhomoktégla falszerkezetű lakóépület — amelyet a továbbiakban *I. sz. épületnek* nevezünk — vizsgálata során találkoztunk. Az elsődleges vizsgálat időpontjában a födémről csak annyit tudtunk, hogy monolit vasbeton gerendák közötti alulról sík előregyártott vasbeton elemekből áll, és a tervtári adatok szerint „Citonit” elnevezésű, amely elnevezés feltehetően a tatabányai „Citadur” bauxitcementre kívánt utalni. Az eredeti statikai számítás mindössze annyit tartalmaz, hogy az építőmester a „Citonit” vasbeton födémért a felelősséget vállalja, és a födém feltehetően hasznos teherrel növelt, de válaszfal nélküli súlya 570 kg/m², szerkezeti magassága 30 cm.

Az I. sz. épület „Citonit” födémére tulajdonképpen azért figyeltünk fel, mert egyrészt azon hézagokat és repedéseket vettünk észre, másrészt annak Schmidt kalapáccsal meghatározott betonhatárfeszültsége 16 kp/cm² értékre adódott. Minthogy a mért betonhatárfeszültség a — az anyag- és szerkezetvizsgáló intézetek közötti, a bauxitbeton vizsgálattal kapcsolatos szabvány által az egyszerűsített eljárás esetén födémekre elfogadott — 26 kp/cm² kritériumértéket nem érte el, szükségesnek láttuk a szóbanforgó födém mibenlétét feltárással felderíteni. A feltárás kapcsán meghatároztuk a monolit gerenda, az előregyártott födémelem, és a födém méreteit, amelyeket az *1. ábrán* tüntettünk fel. A gerendafesztávolság szabad nyílása 5 m. A födémelemek és a gerendák kapcsolatát az elemekből kinyúló 4 db ∅ 6-os acélbetét biztosítja, amelyek a gerendákba bebetonozást nyertek. A feltárt födémszakaszon Schmidt kalapáccsal újból szilárdságmérést végeztünk, amelynek eredményeképpen a gerendára 35 kp/cm², a födémelemre 16 kp/cm² betonhatárfeszültséget kaptunk. A födémgerendára kapott eredmény jól megegyezett az épület hasonló körülmények között készült áthidalóinak betonhatárfeszültségével, amelynek értéke 36 kp/cm². A födémelemeken mért betonhatárfeszültség összhangban van az elsődleges vizsgálat ugyancsak födémelemeken mért eredményével, amellyel kapcsolatban azt kell megjegyezni, hogy az elsődleges vizsgálat során alulról kizárólag az elemeket vizsgáltuk, mert a födémvizsgálatot hidegpadlós helyiségekben hajtottuk végre, ahol a gerendák a válaszfalak alatt helyezkednek el, és így hozzáférhetetlenek.



1. ábra. „Citonit” bauxitbeton-födém U alakú födémelemmel



2. ábra. „Citonit" üreges födémelem

Ezt követően került sor az ugyancsak 1930-ban épült, 3038 légm³-es, ötszintes, 13 lakásos, tégla falszerkezetű *II. sz. lakóépület* vizsgálatára. Az épület tervezője azonos az *I. sz. épület* tervezőjével. Az 1930 szeptemberében keltezett, az építőmestertől származó, és feltehetően a „Citonit" vasbeton födém monolit gerendáira vonatkozó statikai számítás teljes terhelésként 750 kg/m² értékkel, 188 cm terhelési mezőszélességgel és 500 cm gerendafesztávval, illetve 175 cm terhelési mezőszélességgel és 514 cm gerendafesztávval számolva igénybevételként 3550 mkg, illetve 3500 mkg hajlítónyomatékot kap, majd megállapítja, hogy ennek „táblázat szerint" 65 kg/cm² betonfeszültség és 1200 kg/cm² betonacélfeszültség mellett 25 cm magas és 35 cm széles borda felel meg 13,4 cm² betonacél keresztmetszettel. Ugyanakkor leszögezi, hogy a lemez méretezése tanácsi határozat szerint mindaddig, míg annak fesztávolsága 188 cm-nél nem több, felesleges.

Minthogy a „Citonit" födémmel kapcsolatban az *I. sz. épület* felülvizsgálatakor kedvezőtlen tapasztalatokat szereztünk, szükségesnek láttuk a *II. sz. épület* „Citonit" födémét is feltárni. A feltárás során kiderült, hogy az itt alkalmazott előregyártott elemek nem azonosak az *I. sz. épület* U-alakú tálcáival, hanem azok a *2. ábra* szerinti üreges födémelemek. Az üreges „Citonit" födémelemek betonhatárfeszültségére 28 kp/cm², a 22 cm magas, 37 cm széles, 514 cm szabad nyílású és 2 m terhelési sávú födémgerendák betonhatárfeszültségére 58 kp/cm² értéket — tehát lényegesen jobbat, mint az *I. sz. épület* esetén — kaptunk.

Az 1931-ben épült, 2206 légm³-es háromszintes, 9 lakásos, tégla falszerkezetű *III. sz. lakóépületben* és az 1934-ben épült, 2697 légm³-es, négyszintes, 12 lakásos, tégla falszerkezetű *IV. sz. lakóépületben* szintén „Citonit" födémet találtunk, és azokat is feltártuk. Megállapítottuk, hogy az alkalmazott födémelemek a *II. sz. lakóépület* előregyártott üreges „Citonit" födémelemeivel azonosak. Az üreges födémelemek betonhatárfeszültsége a *III. sz. épületben* 28 kp/cm², a *IV. sz. épületben* 16 kp/cm². A *III. sz. épület* 22 cm magas, 37 cm széles, 450 cm szabad nyílású és 2 m terhelési sávú monolit födémgerendáinak betonhatárfeszültsége 35 kp/cm², és ugyanez a *IV. sz. épület* 27 cm magas, 25 cm széles, 5 m szabad nyílású és 2 m terhelési sávú födémgerendái esetén 21 kp/cm². A *II., III., IV. sz. épületek* „Citonit" födémén jelentősebb hézagokat, vagy repedéseket nem találtunk. A káros repedésekkel, alakváltozásokkal kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy a bauxitbeton gerendák a beton szilárdságcsökkenése folytán tulajdonképpen általában túlvasalt szerkezetek, amelyek tönkremenetele során a nyomott betonzóna összemorzsolódását a húzott vasbetétek megfolyása, és így a σ repedések megjelenése nem előzi feltétlenül meg.

A „Citonit" födémeket a feltárás során nyert adatok birtokában statikai számítással, az alábbi négyféle módszert alkalmazva ellenőriztük:

1. A rugalmasságtan III. feszültségi állapota alapján az MSZ 15021—57 szabvány szerint. [1], [2]
2. A rugalmasságtan II. feszültségi állapota alapján az 1909. és az 1931. évi vasbetonszabályzat szerint. [2]
3. A képlékenységtan törési határállapotvizsgálata alapján. [3]
4. A teherbírási tartalékszámítás alapján, amely módszert a Budapesti Műszaki Egyetem Vasbetonszerkezetek Tanszéke dolgozott ki. [4]

A számítások eredményét az *1., 2., 3. táblázatokban* tüntettük fel. A táblázatokban használt jelöléseket a következők szerint értelmezzük:

σ_{bm} = a mértékadó hajlítónyomaték ébresztette mértékadó betonfeszültség
σ_{bH} = a beton méréssel meghatározott határfeszültsége
σ_e = a megengedhető legnagyobb betonfeszültség kéttámaszú tartó esetén hajlítására
M_i = a tartót igénybevevő hajlítónyomaték
M_e = a megengedhető legnagyobb hajlítónyomaték
Y' = a teher biztonsági tényezőkkel fel nem szorzott értéke
Y_t = a törőteher

1. táblázat

Előregyártott födémelemek ellenőrzése III. feszültségi állapotban

Épület jele	Födémelem	σ_{bm} kp/cm²	σ_{bH} kp/cm²	σ_{bH}/σ_{bm}
I.	U-alakú	50	16	0,32
II.	üreges	11	28	2,55
III.	üreges	11	28	2,55
IV.	üreges	12	16	1,33

σ_b' = a megengedhető legnagyobb betonfeszültség — a jelenlegi és a régi szabályzat értékei viszonyának figyelembevételével — korrigált értéke.

Nézzük először az *1. táblázat* eredményeit. Az üreges „Citonit" födémelem jelenlegi állapotában mai előírásaink szerint is megfelelő, és beavatkozást nem igényel.

Az U-alakú „Citonit" födémelem állapota korántsem ilyen kedvező, mert a határfeszültség és a mértékadó feszültség viszonya egynél lényegesen kisebb szám. A *2. táblázatból* kitűnik, hogy az U-alakú födémelem állékonyságát nemcsak a mai, a III. feszültségi állapoton alapuló, hanem a régi, a II. feszültségi állapoton alapuló számításmóddal sem lehet igazolni. Ezek az elemek — mint a *2. táblázat* utolsó sora tanusítja — ma már teherbírási tartalékkal akkor sem rendelkeznének, ha készítésük idején az előírásoknak megfeleltek volna. A törési határállapot vizsgálata adja meg a magyarázatot arra, hogy az U-alakú födémelemek mindezek ellenére állnak. Ez azonban mit sem változtat azon a tényen, hogy az U-alakú födémelemek nem tekinthetők biztonságosnak, és ezekkel kapcsolatban a szükséges intézkedéseket meg kell tenni.

Ennél is kedvezőtlenebb a monolit födémgerendák helyzete, ami nemannyira a bauxitbeton szilárdságcsökkenése, mint inkább a gerendák a régi előírás szerint is alulméretezett volta folytán állt elő, és ezért egy egyszerűsített bauxitbeton felülvizsgálat során megtévesztő lehet. A *3. táblázat* adatai azt bizonyítják, hogy a monolit födémgerendák — akár a III. feszültségi állapot, akár a

2. táblázat

Az I. sz. épület U-alakú födémelemeinek ellenőrzése

III. feszültségi állapot	σ_{bm} kp/cm²		σ_{bH} kp/cm²	σ_{bH}/σ_{bm}
	50		16	0,32
II. feszültségi állapot	σ_e kp/cm²	M_i mkp	M_e mkp	M_e/M_i
1909. év	45	125	52	0,42
1931. év	60	125	80	0,64
Törési határállapot	Y' kp/fm		Y_i kp/fm	Y_i/Y'
	283		479	1,69
Teherbirási tartalék	σ_e kp/cm²	σ_e' kp/cm²	σ_{bH} kp/cm²	σ_{bH}/σ_e'
1909. év	45	14	16	1,14
1931. év	60	19	16	0,84

3. táblázat

Monolit födémgerendák ellenőrzése

III. feszültségi állapot	σ_{bm} kp/cm²	σ_{bH} kp/cm²	σ_{bH}/σ_{bm}
I. sz. épület	86	35	0,41
II. sz. épület	75	58	0,77
III. sz. épület	57	35	0,61
IV. sz. épület	74	21	0,28

II. feszültségi állapot	σ_e kp/cm²	M_i mkp	M_e mkp	M_e/M_i
1909. év				
I. sz. épület	45	3407	862	0,25
II. sz. épület	45	3542	1065	0,30
III. sz. épület	45	2772	1065	0,38
IV. sz. épület	45	3738	1114	0,30
1931. év				
I. sz. épület	60	3407	1332	0,39
II. sz. épület	60	3542	1632	0,46
III. sz. épület	60	2772	1632	0,59
IV. sz. épület	60	3738	1717	0,46

Törési határállapot	Y' kp/fm	Y_i kp/fm	Y_i/Y'
I. sz. épület	1210	1449	1,20
II. sz. épület	1210	2802	2,32
III. sz. épület	1210	2183	1,80
IV. sz. épület	1337	1117	0,84

Teherbirási tartalék	σ_e kp/cm²	σ_e' kp/cm²	σ_{bH} kp/cm²	σ_{bH}/σ_e'
1909. év				
I. sz. épület	45	19	35	1,84
II. sz. épület	45	29	58	2,00
III. sz. épület	45	19	35	1,84
IV. sz. épület	45	14	21	1,50
1931. év				
I. sz. épület	60	26	35	1,35
II. sz. épület	60	39	58	1,49
III. sz. épület	60	26	35	1,35
IV. sz. épület	60	19	21	1,11

II. feszültségi állapot alapján számolunk — nem megfelelőek. Ha a gerendák a II. feszültségi állapotban megfelelnének, akkor többé-kevésbé teherbírási tartalékuk is lenne.

Valami biztonsági tartalékkal még így is rendelkeznek a gerendák — hiszen az Y_{II}/Y' viszonyszámok segítségével rangsorolt szerkezetek leggyengébbike, a *IV. sz. épület* födémgerendái is különösebb alakváltozás nélkül állnak —, aminek okát számítási eljárásunk biztonságában, tehát abban kell keresnünk, hogy a terhek a számítottnál kisebbek, a hasznos teher nem jelentkezik totálisan, főként az alsóbb szinteken a számítottnál nagyobb a befogás mértéke, a beton törőfeszültsége nagyobb a határfeszültségnél, amiben az is közrejátszik, hogy a Schmidt kalapácsos eljárás nem középértékeket, hanem vizsgálati szórással csökkentett kockaszilárdság értékeket ad.

Kérdés azonban, hogy mekkora ez a biztonsági tartalék. A megvizsgált „Citonit" födémgerendák ma ugyan állnak, de biztonságuk lényegesen kisebb nemcsak az újonnan épülő szerkezetek, hanem az illékonynak minősített bauxitbeton szerkezetek biztonságánál is. A még meglevő biztonság nagyságát abszolút értelemben kizárólag próbaterheléssel lehetne meghatározni. Relatív értelemben azonban mintegy képzelt, és nem a tönkremenetelig végzett próbaterhelésként egy gyengébb álló szerkezet a jobb állapotban levőre nézve biztonságul szolgálhat. Követelmény ezen felül, hogy a megtartani szándékolt szerkezet törési határállapotra vonatkozó Y_{II}/Y' viszonyszáma 1-nél esetenként mérlegelt értékkel nagyobb legyen. Körülményeink között 1,5 tekinthető ezen viszonyszám kritériumértékének.

Mindezek alapján véleményünk szerint az *I. és IV. sz. épületek* „Citonit" födémei sürgős tehermentesítést igényelnek, míg a *II. és III. sz. épületek* födémei esetén a beavatkozás gazdasági érdekből elhalasztható, de szükség van a födémek és az Y_{II}/Y' viszonyszám időben való változásának megfigyelésére.

Végső következtetésünk az, hogy a bauxitbetonnal készült épületek felülvizsgálata során kritikus szilárdságértékek esetén nem szabad megelégedni a betonszilárdságvizsgálat egyébként szokványos végrehajtásával, hanem egyebek mellett a különféle számításmódok alkalmazásával, ezek, valamint a különböző épületek azonos szerkezetekre kapott eredményeinek összevetésével is törekedni kell a szerkezet jobb megismerésére, mert ennek elmulasztása helytelen döntések születésének veszélyét rejtheti magában.

IRODALOM

[1] MSZ 15 021—57 Épületek teherhordó szerkezetei Általános statikai előírások.

[2] *Mihailich, Gy. — Paloás, L.:* Vasbetonépítéstan. A vasbeton szilárdságtana. Tankönyvkiadó, Budapest. 1964.

[3] *Kaliszky, S.:* Képlékenységtan. Kézirat. R. sz.: J 9—747. Tankönyvkiadó, Budapest. 1967.

[4] *Bölcskei, E.—Szalai, K.:* Bauxitbeton építmények teherbírási tartaléka. Magyar Építőipar. 18. évf. 1969. 9—10. sz. 465—486. p.

T. Каушаи: **Перекрытия типа „Цитонит", обнаруженные во время контроля бокситных бетонов**

Kausay, Tibor: **Die gelegentlich der Untersuchung von Bauxitbetonen vorgefundene ‚Citonit' Decken**

Kausay, Tibor: **"Citonit" Roof Investigated During Testing High—Alumina Concrete Strucures**

Ajánlott további olvasmány: http://www.betonopus.hu/notesz/bauxitbeton.pdf

A bauxitbetont tartalmazó hazai épületek jegyzéke itt található:
https://emi.hu/EMI/web.nsf/Pub/bauxitbeton_epuletek.html

ÁLTALÁNOS RÉSZ.

»Citonit« újrendszerű födém elvi engedélyezése.

A *polgármester* f. évi február hó 12-én 17.472/1931—III. szám alatt a következő véghatározatot adta ki:

A Fővárosi Közmunkák Tanácsának 4965/1930. számú átirata alapján Jónás Ferenc részére a »Citonit« újrendszerű födém alkalmazására az elvi engedélyt megadom.

Ennek az elvi engedélynek a következő feltételei vannak:

A födém egyik elemét képező kész vasbetonlemez legfeljebb 0·50 m széles és 1·82 m hosszú lehet legalább 4 cm vastag legyen, a szélein 4×5 cm méretű peremmel, legalább 7 db 7 $^{m}/_{m}$-es hosszú vasbetéttel legyen szerelve.

A helyszínen készülő bordák egymástól (szabad köz, nem tengelytáv) legfeljebb 1·70 méternyire lehetnek. A lemezek legalább kétszer 2 db 5 $^{m}/_{m}$-es vasbetéttel legyenek a borda felső részébe felkötve.

Úgy a bordák, mint a lemezek oly betonból készítendők, melynek köbméterében 270 kg Citadur bauxit cement legyen. Ettől eltérő keverőarány csak esetről-esetre engedélyezhető előzetes kísérletek alapján.

A betonnak 48 óra mulva legalább 200 kg/cm² kocka szilárdsággal kell rendelkeznie.

A lemezek szilárdságát számításokkal igazolni nem kell, a bordákét ellenben minden esetben igazolni kell. A számítás a vasbetonszerkezetekre szokásos módon történjék.

A födém csak 24 óra mulva saluzható ki és csak 48 óra mulva terhelhető meg a számításszerű teherrel.

Fenntartom a jogot ennek az engedélynek módosítására, vagy visszavonására.

ÁLTALÁNOS RÉSZ.

»Citonit«-födém elvi engedélyezése.

A *polgármester* f. évi március hó 20.-án kelt 49.720/1932—III. számú véghatározatával a Fővárosi Közmunkák Tanácsának 669/1932. sz. átirata alapján *Jónás* Ferenc részére a 17.472/1931—III. sz. végházattal elvileg engedélyezett »Citonit« újrendszerű födémnek a benutatott tervek szerinti megváltoztatott alakjának alkalmazására az elvi engedélyt megadta.

A 17.472/1931—III. sz. véghatározat első kikötésének hatályon kívül helyezése mellett kikötötte a következőt:

A födém egyik elemét képező vasbetonlemez legfeljebb 0·50 m széles és 1·82 m hosszú lehet; legalább 12 cm vastag legyen. A lemezben 2—2 egymástól bordákkal elválasztott üreg lehet úgy, hogy az üreg felett a lemez 3·5 cm-nél vékonyabb ne legyen. Minden lapban legalább 3 darab 6 mm hosszirányú vasbetét legyen.

A 17.472/1931—III. sz. véghatározatban foglalt többi kikötések egyébként érvényben maradnak.

Folyamodó 10 pengő elvi építési engedelmi díjat az 1931. évi I. 7. napló 9449. tétele alatt a székesfőváros központi pénztárába befizetett.

Ez ellen a véghatározat ellen a kézbesítéstől számított 15 nap alatt fellebbezést lehet előterjeszteni.

Bauxitbeton

DR. KAUSAY TIBOR
betonopu@t-online.hu, http://www.betonopus.hu

- Bauxitbeton, Tonerdebeton, Tonerdezementbeton, Beton auf Tonerdezementbasis (német)
- Concrete with bauxite cement, concrete with aluminous cement (angol)
- Bauxitebéton, béton avec ciment de bauxite, béton avec ciment de alumineux (francia)

Cementkémia

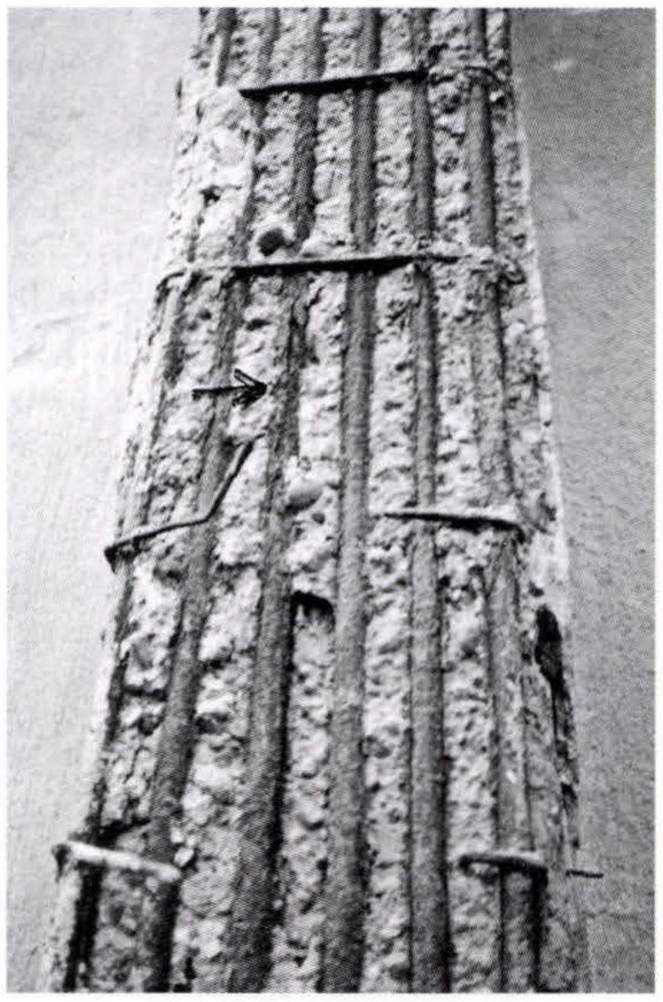
A bauxitbeton kötőanyaga az aluminátcementek fajtájába tartozó bauxitcement. Kémiai összetétele, tulajdonságai, színe lényegesen különbözik az építőipari célra általánosságban, napjainkban kizárólagosan használt portlandcementekétől {◀}. A bauxitcement színe világosbarna, vörösesbarna, elnevezése egyrészt arra utal, hogy nyersanyaga a timföldcementétől eltérően bauxit, de másrészt égetési sajátságokat is kifejez (Talabér, 1966; Palotás, 1979 és 1980).

Az aluminátcementek, így a bauxitcement is - hasonlóan a portlandcementekhez - levegőn és víz alatt egyaránt szilárdul, azaz hidraulikus tulajdonságú, szilárdulás közben hőt fejleszt, habarcsok és betonok előállítására alkalmas. Szilárdulása azonban a portlandcement szilárdulásánál sokkal gyorsabb, és szilárdulás közbeni felmelegedése a portlandcementénél sokkal jelentősebb. A bauxitcement gyártásával és felhasználásával nem akarták a portlandcementet kiszorítani, - nem kis anyagi áldozat árán, mert drágább volt a portlandcementnél - csak ott használták, ahol különleges tulajdonságaira feltétlenül szükség volt: a betonok gyors kizsaluzhatóságát és használatbavételét, valamint a téli betonozást kívánták általa megoldani.

Míg a kötésszabályozó és egyéb kiegészítő anyagoktól elvonatkoztatva a portlandcement legfőbb nyersanyaga a mészkő és az agyag, addig a bauxitcementé a mészkő és a bauxit. A cementgyártás során a nyersanyagok törésével, őrlésével és megfelelő arányú keverésével nyerslisztet állítanak elő, abból általában gömbszerű granulátumot képeznek, és azt cementfajtától függő hőmérsékleten és módszerrel kiégetik. Megjegyzendő, hogy a bauxitcement gyártásához nem kell feltétlenül granulálás. Tatabánya-Felsőgallán például téglákká formázva égették Hofmann-féle körkemencében. Máskor az előkészítetlen nyerskeveréket olvasztják össze elektromos kemencében, ismét máskor nagyolvasztóban égetik. Az égetés eredményeképpen áll elő a klinker, a félkész termék, amelynek finomra őrlésével készül a bauxitcement.

Leegyszerűsítve mondhatjuk, hogy a portlandcement klinker {◀} elsősorban kalcium-szilikátokból, a bauxitcement-klinker elsősorban kalcium-aluminátokból áll (Talabér, 1966; Palotás, 1979 és 1980).

A portlandcementek és az aluminátcementek hidratációs és szilárdulási folyamata {◀} között az a legdöntőbb különbség, hogy az előzőnél a beton keveréshez használt vízzel való reakció folyamán még geológiai értelemben véve is stabil hidratációs termékek keletkeznek, az aluminátcementeknél viszont a szokványos körülmények között elsődlegesen létrejövő és nagy kezdőszilárdságot biztosító hidratációs termékek instabilak, és



1. ábra Bauxitbeton pillér, a nyílnál elvékonyodott acélbetéttel

2. ábra: Kifúrt bauxitbeton minta

idővel stabil vegyületekké alakulnak át. E stabil kalcium-aluminátok térfogata kisebb, mint az instabilaké, ezért kialakulásuk a cementkő porozitásának {◀} növekedésével és ennek következtében a beton szilárdságának {▶} csökkenésével jár (1-2. ábra). Talabér (1991) kimutatta, hogy az átalakulás termodinamikailag törvényszerű, amit a hőmérséklet, a készítéskori vízcement tényező {◀}, a rendszer pH értéke, CO_2 tartalma, alkáli tartalma jelentősen befolyásol.

Újabb megállapítás, hogy a stabilitás irányába ható kémiai reakciók folyamata a teljes átalakuláshoz közeledve lelassul, majd gyakorlatilag meg is áll. Kedvező esetben felléphetnek olyan folyamatok, amelyek hatására minimális mértékű szilárdságnövekedés is végbemehet (Révay, 1995; Talabér, 1996).

A bauxitcement gyártás és bauxitbeton készítés története

A bauxitcement gyártását Jules Bied francia vegyész eljárása alapján "Lafarge Fondu" elnevezés alatt 1908-ban szabadalmaztatták. Az első gyártási kísérleteket 1913-ban végezték a francia Lafarge-gyárban, majd - miközben gyors szilárdulása miatt néhány helyen közben már alkalmazták - öt év múlva, 1918-ban hozták forgalomba "Ciment Fondu" néven. A mintegy tíz év múlva már jelentkező szilárdság csökkenés miatt felhasználását Franciaországban 1927-től kezdve fokozatosan szigorították, 1943-tól előzetes engedélyhez kötötték, ami gyakorlatilag a betiltást jelentette. E tiltást a fontos építkezésekre vonatkozólag, szigorú felhasználási előírások egyidejű megfogalmazása mellett, 1970-ben feloldották (Faurie - Rabot, 1972).

Időközben több más államban a bauxitcementet elfogadták és szabványosították. A bauxitcement után megjelentek és elterjedtek az aluminátcementek is - ilyen például a timföldcement -, ezeket azonban lényegében nem építési célra, hanem tűzállóanyagok gyártására használták és használják ma is.

Magyarországon a Magyar Általános Kőszénbánya Rt. Tatabányai Felsőgallán gyártott bauxitcementet, amely "Citadur bauxitcement" néven 1928-ban került forgalomba. A gyártott mennyiség sohasem érte el a napi 200 tonnát (Balázs, 1994). Találkoztunk olyan födémekkel, amelyeket e cementről elnevezve "Citonit" födémnek hívtak (Kausay, 1970). A bauxitbeton szilárdságcsökkenésére hazánkban Mihailich már 1936-ban felfigyelt, és kísérleteinek eredményéről 1942-ben előadást is tartott. A felsőgallai "Citadur bauxitcement" gyártása nagyobb mennyiségben 1942-ben, végleg 1949-ben szűnt meg, a felhasználás 1950-ig, legfeljebb 1954-ig tartott (Balázs, 1994). Volt tehát 10-14 év - éppen a hazai építőipar konjunkturális évei -, amely alatt számos ipari épület, középület, lakóépület tartószerkezete, vagy szerkezeti eleme bauxitbetonból készült, és amelyek szilárdságcsökkenése az idő haladtával fokozódott (Rausch, 1967).

A bauxitbeton épületek felülvizsgálata

A bauxitbeton épületek számbavétele, vizsgálata, az esetleg szükséges beavatkozások megtervezése és elvégzése az 1960-as évek derekára sürgetővé vált. Az Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium a bauxitcement felhasználásával készült épületek állékonyságának felülvizsgálatát a 6/1967. ÉVM sz. körrendelettel tette kötelezővé. A felülvizsgálat elvégzésére kiemelten öt intézményt, az Építéstudományi Intézetet, az Építőipari Minőségvizsgáló Intézetet, a Szilikátipari Központi Kutató és Tervező Intézetet, a Földmérő és Talajvizsgáló Vállalatot, az Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetemet jelöltek ki. A kijelölt intézmények 1972-ig mintegy 1600 épületet, ezen belül 1200 lakóépületet tártak fel. A 19/1969. (VII.17.) ÉVM sz. rendelettel, a 23/1970. (XII.20.) ÉVM sz. rendelettel és a 16/1970./Ép.Ért.35. ÉVM sz. utasítással újból szabályozták a bauxitbetonos építményekkel kapcsolatos feladatokat (Vadász, 1972). Ezek szellemében végzett folyamatos feltáró munka eredményeképpen 1990-ben már 2034 bauxitbeton épületet ismertek, ebből 1717 épületet a fővárosban (Balázs, 1994). Az építésügyi hatóság a felülvizsgálati szakvélemények, jegyzőkönyvek alapján hozott határozatot az építmény további sorsáról.

A bauxitbeton építmények, épületek állapotának vizsgálatát általában roncsolásmentes betonszilárdsági és acél korróziós gyors vizsgálattal végezték, és annak kedvezőtlen eredménye esetén roncsolásos betonszilárdsági, kristallográfiai, és egyéb részletes beton és acél korróziós vizsgálattal folytatták, illetve így járnak el ma is. A követendő vizsgálati és számítási módszerekről 1968-1970 között különböző szintű (házi, intézetek közötti, ágazati) bauxitbeton vizsgálati és erőtani szabványok, illetve tervezetek, javaslatok készültek (ÉMI-HSz-605/1968, SzSz-2-T/1968, ÉSZ K-3-T/1968, ÉSZ 69-T/1969, ÉSZ 24-T/1968, ÉSZ 24-T és J/1970).

A gyors (egyszerűsített), roncsolásmentes vizsgálatok eredményéből meghatározott határfeszültség alapján a bauxitbetonból készült vasbeton építményeket és szerke-

Kategória (veszélyességi) csoport	Központosan nyomott elem	Külpontosan nyomott elem	Hajlított elem
	Beton határfeszültség, σ_{bH} N/mm²		
A	$\sigma_{bH} \geq 5,0$	$\sigma_{bH} \geq 4,0$	$\sigma_{bH} \geq 3,5$
B	$5,0 > \sigma_{bH} \geq 3,5$	$4,0 > \sigma_{bH} \geq 3,0$	$3,5 > \sigma_{bH} \geq 2,5$
C1	$3,5 > \sigma_{bH} \geq 3,0$	$3,0 > \sigma_{bH} \geq 2,5$	$2,5 > \sigma_{bH} \geq 2,0$
C2	$3,0 > \sigma_{bH}$	$2,5 > \sigma_{bH}$	$2,0 > \sigma_{bH}$

Megjegyzés: *Ma* a vasbeton szerkezetbe beépíthető leggyengébb MSZ 4798-1:2004 szerinti (természetesen nem bauxitbeton) közönséges beton (C20/25 nyomószilárdsági osztály) előírt beton határfeszültsége (mai nevén a beton nyomószilárdság teherbírási tervezési értéke) 13,3 N/mm².

1. táblázat Vasalt bauxitbeton szerkezetek veszélyességi csoportba sorolása egyszerűsített eljárás esetén

zeti elemeket állapotuk szerint veszélyességi csoportokba sorolták, illetve sorolják (1. táblázat). Az előírt számítási módszer szerint a bauxitbeton határfeszültsége a küszöbszilárdság 0,78-szorosa.

A bauxitbeton szerkezetek kategóriánkénti állapotleírása és a végrehajtandó intézkedések a következők:

- "A" kategóriájú az építmény vagy tartószerkezeti elem, ha állékonysága és betonszilárdsága megfelelő, és belátható időn belül beavatkozásra nincs szükség. A roncsolásmentes betonszilárdsági és acélkorróziós gyors vizsgálatot nyolc év múlva meg kell ismételni.
- "B" kategóriájú az építmény vagy tartószerkezeti elem, ha állékony, de betonszilárdsága gyenge és nem kizárt, hogy néhány év múlva állapotával kapcsolatban valamilyen intézkedés szükségessé válik. A roncsolásmentes betonszilárdsági és acélkorróziós gyors vizsgálatot öt év múlva meg kell ismételni, továbbá erőtani felülvizsgálat is szükséges lehet.
- "C1" kategóriájú az építmény vagy tartószerkezeti elem, amelynek állapota és betonszilárdsága nem megfelelő. Az életveszély elhárításához szükséges intézkedéseket további, részletes vizsgálatok eredménye és erőtani felülvizsgálat alapján kell megtenni. Az erőtani vizsgálat és az esetleg szükséges megerősítések számításainak elvégzésére Brúzsa László födém ábráival illusztrált segédletet bocsátottak ki (Gábory, 1969).
- "C2" kategóriájú az építmény vagy tartószerkezeti elem, amelynek állapota és betonszilárdsága annyira kritikus, hogy az életveszély elhárítása érdekében minden további vizsgálat nélkül azonnal intézkedni kell.

Az elkészült bauxitbeton szakvélemények és vizsgálati jegyzőkönyvek egy példányának megőrzését, az építmények nyilvántartásba vételét az ÉVM 1970-ben az ÉMI Építőipari Minőségvizsgáló Intézetre bízta. Az épített környezet alakításáról és védelméről szóló 1997. évi LXXVIII. törvény V. fejezet 58. § (2) bekezdés l) pontja szerint a bauxitcementtel épült építményekről ma is hatósági nyilvántartást kell vezetni. A nyilvántartásban foglaltakról az ÉMI Építésügyi Minőségellenőrző Innovációs Kht. adattárában lehet felvilágosítást kapni. A bauxitbeton szerkezetek átalakításához szükséges engedélyezési kérelmet szakhatósági véleményezésre az ÉMI Kht-hez kell benyújtani.

A bauxitbeton épületek karbantartása, időszakos felülvizsgálata a tulajdonos feladata [23/1970. (XII. 20.) ÉVM sz. rendelet], és bár a veszélyes épületrészek nagy részét már lebontották vagy megerősítették, és a szilárdságcsökkenési folyamat lelassult vagy feltehetően megállt, az óvatosság továbbra is fontos, annál is inkább, mert szórványosan még napjainkban is vannak feltáratlan, nyilvántartásba nem vett, megerősítendő bauxitbeton szerkezetek, szerkezeti elemek. Gyanú esetén, ha a beton színe vörösesbarna, ha az építés vagy átalakítás 1928-1950 között történt, szakértőhöz vagy szakértő intézethez kell fordulni.

Felhasznált irodalom

[1] Talabér József: Az aluminátcement-betonok tartóssága. Akadémiai doktori értekezés. MTA, Budapest, 1991.

[2] Révay Miklós: A bauxitcement diadala, bukása és feltámadása. Beton. 1995. 9., 10., 11. szám.

[3] Talabér József: Az aluminátcementek mai szemmel. Építőanyag. 1996. 4. szám. pp. 107-113.

[4] Faurie, M. T. - Rabot, M. R.: A "Ciment Fondu" aluminátcement. Kézirat. SZTE, 1972.

[5] Kausay Tibor: A bauxitbeton felülvizsgálata során talált "Citonit" födémekről. Építőanyag. 1970. 8. szám. pp. 317-320.

[6] Mihailich Győző: A meleg befolyása a bauxitcement-beton szilárdságára. Mathematikai és Természettudományi Értesítő. 1936. pp. 30.

[7] Mihailich Győző: A beton- és vasbetonépítés újabb fejlődése. A Mérnöki Továbbképző Intézet kiadványai. III. kötet. 14. füzet. Budapest, 1942.

[8] Rausch Róbert: Bauxitbeton épületszerkezetek vizsgálata és javítása. ÉVM, ÉTK. Budapest, 1967.

[9] Palotás László: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 3. kötet. Akadémiai kiadó. Budapest, 1980.

[10] Vadász János: Tájékoztató a bauxitbetonból készült épületek felülvizsgálatáról. ÉVM, ÉTK. Budapest, 1972.

[11] Balázs György: Beton és vasbeton. I. Az alapismeretek története. Akadémiai Kiadó. Budapest, 1994.

[12] Gábory Pál: Bauxitbeton épületek állagbiztosítása. Építéstudományi Intézet. Budapest, 1969.

Jelmagyarázat:

{◀} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.

{▶} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

HÍREK, INFORMÁCIÓK

A világ 82 országában működő, független Superbrands elismert szakértőkből álló bizottsága idén is díjazásra javasolta a márkaépítésben élenjáró vállalkozásokat. Az 1995-ben Nagy-Britanniában létrehozott társaság magyarországi szervezete idén negyedszer adományozza a Superbrands 2008 díjat az arra érdemesnek tartott vállalkozások részére.

Magyarországon 2008-ban első alkalommal ítéltek oda Business Superbrands 2008 díjat, mely a Business to Business márkák legkiválóbbjait ismeri el, azon cégeket, amelyek a minőséget, a megbízhatóságot képviselik.

A díjazottak között találjuk a Holcim Hungária Zrt.-t és a Murexin Kft.-t is. A Holcim Hungária Zrt. kiemelt figyelmet fordít a vállalati felelősségvállalásra, a környezetvédelemre, a tehnológiai fejlesztésre, a fenntartható építészet hazai meghonosítására.

A Murexin márka idén 15 éve van jelen Magyarországon, hidegburkolat ragasztási rendszereket, melegburkolati ragasztókat és lakkokat, építési vegyianyagokat, festékeket forgalmaz.

	Fagyálló beton, fagy- és olvasztósó-álló beton **Fagyállóság és vizsgálat**	

Németül:	Frostbeständiger Beton Beton mit Frost- und Tausalz-Widerstand
Angolul:	Concrete for frost resistance Concrete for frost and de-icing salt resistance
Franciául:	Béton résistant au gel Béton résistant au gel et aux sels de déverglaçage

Bevezetés

A beton fagykárosodása általában szövetszerkezeti roncsolódás, illetve – főképp olvasztósó vagy más olvasztószer használata esetén – felületi mállás formájában jelentkezik. Mértéke a betont tekintve elsősorban annak porozitásától, víztartalmától és korától, a külső körülményeket tekintve a fagyhullámok gyakoriságától függ. Az eső után gyorsan kiszáradó magasépítési betonok fagyveszélye kisebb, mint a nehezen kiszáradó alapbetonoké és útpályabetonoké. Az utóbbiak fagyállóságát általában csak légbuborékképző adalékszer alkalmazásával lehet biztosítani. Ugyanez áll fenn a repülőtéri betonburkolatok esetén is, annak ellenére, hogy azok téli jégmentesítését a sónál kevésbé agresszív kloridmentes olvasztószerrel végzik.

A fagykárosodás elkerülésére a következő intézkedések tehetők:

- Elő kell segíteni a csapadékvíz betonfelületről való távozását. Vízszintes felületek esetén a víztelenítést már 2 % oldalesés is jelentősen előmozdítja. A vízorr úgy alakítandó ki, hogy a betonalakzat alsó felületén ne legyenek vízfolyások.
- A beton fagyállóságát – szemben például a nyomószilárdsággal – a sok ismeretlen folytán számszerűsíteni gyakorlatilag nem, csak becsülni lehet. Ezért egyrészt a betont a szabványokban szereplő környezeti osztályok [*Kausay*, 2009] feltételeinek megfelelő összetétellel (víz-cement tényező, cementtartalom), tömörséggel (levegőtartalom) és nyomószilárdsággal kell készíteni, másrészt a beton fagyállóságáról sokszor hosszadalmas kísérletekkel kell meggyőződni.
- Gondoskodni kell arról, hogy a betont egy hónapos kora előtt ne érje fagyhatás, illetve az első fagy a fiatal betont kiszáradt állapotban érje. A tavasszal vagy nyáron készített beton a fagy és a jégolvasztósó károsító hatásának sokkal jobban ellenáll, mint a késő ősszel vagy télen készített beton. Ha a beton legalább egy hétig 20 °C hőmérsékleten szilárdul, akkor általában eléri a 28 napos szilárdság 80 %-át.
- A fiatal beton nyomószilárdsága az első fagy idején legalább 5 N/mm^2 és száraz állapotú legyen. Ha a fiatal beton külső hatásra nedves, mert például a kémiai zsugorodáskor részben kiszáradt kapilláris pórusok ❖ az őszi esőzések alkalmával utólag esővizet szívnak fel, és fagyhatás éri, akkor nagy valószínűséggel károsodni fog.
- Ha fagypont körüli hőmérsékleten kell betonozni, akkor a betonkeveréket általában +15 °C hőmérsékletre (a szabványok szerint legalább +10 °C hőmérsékletre) kell melegíteni. Az ilyen fiatal betont például szorosan illeszkedő fóliatakarással védeni kell a gyors kiszáradástól, a fóliáról lecsepegő kondenzvíztől, és nem szabad vízzel utókezelni. A fóliatakarás alá célszerű hőszigetelő réteget fektetni.
- A betont a lehető legkisebb víz-cement tényezővel és minél kevesebb akaratunk ellenére bevitt (bennmaradt) levegőtartalommal (légpórustartalommal) kell elkészíteni.

- Fagy- és olvasztósó-álló mélyépítési betonkeverékhez feltétlenül légbuborékképző adalékszert ❖ kell használni, de a légbuborékképző adalékszer a magasépítési betonok fagy- és olvasztósó-állóságát is javítja.
- A 4 mm feletti adalékanyag szemek fagyállóak legyenek.
- Az adalékanyag, főképp a homok és a kőliszt agyag-iszaptartalmát és vízigényét alacsony szinten kell tartani. A 4 mm alatti adalékanyag mennyisége kevesebb legyen annál, mint amennyi ahhoz kell, hogy a betömörített beton felületén számottevő habarcsréteg keletkezzen. [*Springenschmid*, 2007]

Fagykárosodás folyamata

Ha a beton nem fagyálló, akkor fagyhatásra hajszálrepedések keletkeznek, amelyek vízzel megtelnek. Az újabb fagyok ezeket a repedéseket tágítják, aminek hatására a beton szövetszerkezete egyre inkább roncsolódik (*1. ábra*). A tönkremenetel oka szerteágazó, leegyszerűsítve négy fő okkal szokás a fagykárosodást magyarázni:

1. A fagyás során már az első jégkristály csírák vizet szívnak a környező kisebb pórusokból, és e helyeken a betonban mikro-jéglencsék képződnek.
2. Minthogy a jéggé fagyó víz térfogata 9 százalékkal növekszik, ha a beton pórusai térfogatának több mint 90 százaléka vízzel telt, akkor fagy esetén betonduzzadást okozó és hajszálrepedéseket ébresztő pórusvíznyomás lép fel. A beton duzzadása 50 fagyasztási ciklus hatására a 0,4 mm/m értéket is megközelítheti. A megfagyott beton rugalmassági modulusa felengedett állapotban az eredetinél kisebb.
3. A pórusvíz csak néhány fokkal 0,0 °C hőmérséklet alatt fagy meg a vízben oldott sók és a jégkristály csíra képződés szükségessé folytán. A pórusvíz fagyáspontja a pórusméret csökkenésével, a pórusnyomás ezzel járó növekedésével csökken. Jelentősebb lehűlés esetén a vízzel telített betonréteg hirtelen átfagy, miközben ΔT hőmérsékletnövekedés mellett duzzad; a jégnyomás gyors növekedése a szövetszerkezetet húzásra veszi igénybe, mígnem az megreped.
4. A légbuborékos beton fagyállóságát eddig mindenekelőtt azzal magyarázták, hogy a sok kis levegővel telt buborék a megfagyó víz nyomását felveszi. Újabb kutatások szerint ennél nagyobb jelentősége van annak, hogy az első jégkristály csírák víz elszívását a légbuborékok megtörik. [*Springenschmid*, 2007]

1. ábra: Fagykárosodott vasalt beton hídkorlát

Olvasztósó hatása

Az utak jég- és hómentesítését általában nátrium-kloriddal (*2. ábra*), némely esetben kálcium-kloriddal (nagyon alacsony hőmérséklet esetén), magnézium-kloriddal (átlagosnál jobban óvott helyszíneken) végzik. Repülőtéri betonpályák téli csúszásgátlását karbamiddal, alkohollal, kálium- és nátrium-acetáttal, valamint szerves anyagok keverékével oldják meg. Ezek az anyagok valamennyien hasonló módon károsítják a betont elsősorban fizikailag, de bizonyos mértékben kémiailag is. Alkalmazásuk fő hátránya, hogy fokozott nedvszívóképességük ((higroszkóposságuk) és oldataik alacsony felületi feszültsége folytán a beton víztelítettsége megnő.

Tapasztalatok szerint először a beton olvasztósóval át nem itatott mélyebb rétege és az a felszíni rétege fagy meg, amelynek hőmérséklete nagyon alacsony, de a fagypont megfelelő leszállításához szükséges sótartalma kevés. Ha további lehűlés esetén a közbenső réteg megfagy, akkor az a felső réteget ledobja. Ez magyarázatát adja annak, hogy miért nagyobb a fagykár, ha az olvasztósó koncentráció csak 1-3 %, és miért kisebb már néhány év múlva, amikor az olvasztósó-oldat már mélyebben beszivárog.

A vasbetonba beszivárgó klorid az acélbetétet megtámadja, az korrodál és megrepeszti a betont, és a korrózió akár acélbetét szakadáshoz is vezethet.

Megjegyezzük, hogy a só a növényvilágra is károsan hat és a vizeket is szennyezi, ezért külföldön számos helyen, de például természetvédelmi területeken hazánkban is tiltják az alkalmazását (*3. ábra*).

2. ábra:
Zsákolt olvasztósó

3. ábra:
Olvasztósózás alól kivont erdei út

Fagy- és olvasztósó-álló betonok és összetevőik tulajdonságai

A fagy hatásának vagy a fagy és olvasztósó hatásának kitett betonoknak ki kell elégíteniük az MSZ EN 206-1:2002, illetve az MSZ 4798-1:2004 szerinti környezeti osztályok ❖ követelményét, és általában ki kell állniuk a fagy- és olvasztósó-állósági vizsgálatot is.

Ha a beton nincs olvasztósó hatásának kitéve és felülete függőleges (XF1 környezeti osztály), akkor az érdekelt felek megegyezése esetén a fagyállóságot szabad közvetett módon, a betonösszetétel határértékeivel előírni.

A beton fagyállósága jelentős mértékben függ a környezeti körülményektől (pl. a kritikus víztelitettség esélyétől), a beton összetevőinek tulajdonságától, a beton víz-cement tényezőjétől és struktúrájától, beleértve a légbuborékképző adalékszerrel bevitt légbuborékok méretét és eloszlását is.

A fagyálló beton készítésének feltétele a környezeti osztályok követelményén kívül a fagyálló adalékanyag, a megfelelő cement és légbuborékképző adalékszer alkalmazása, a hosszas utókezelés, a betonozás és a tél bekövetkezte közötti hosszú idő.

A fagyállóság szempontjából technológiailag előnyös a vákuum kezelés vagy a zsaluzati víztelenítő réteg (németül: Schalungsbahn) alkalmazása, amelyek esetén a beton felületén a víz-cement tényező lecsökken, a felületi réteg tömör lesz, és kevésbé karbonátosodik. [*Springenschmid*, 2007]

Adalékanyag megfelelősége

Az MSZ EN 12620:2006 betonadalékanyag szabvány szerint a durva (2 mm feletti) adalékanyagok ❖ fagy- és olvasztósó-állóságát közvetlen fagyállóság vizsgálattal és közvetett módon, szulfátos kristályosítási vizsgálattal lehet meghatározni. A szabvány F melléklete a kőzettani és a vízfelvétel vizsgálatot ún. elővizsgálatnak nevezi, amelyek kimutathatják a kőanyag fagyérzékenységét, és az elővizsgálatok követelményét kielégítő kőanyagokat fagyállónak tekinti. A fagyállónak tekintett kőanyagra nézve számszerű követelmény, hogy az MSZ EN 1097-6:2001 szerint meghatározott vízfelvétele nem haladhatja meg az 1 tömeg%-ot.

A homokos kavics adalékanyag fagyállóságát hazánkban nem szokás vizsgálni, bár lehet, hogy ezt a gyakorlatot a jövőben felül kell vizsgálni.

Az MSZ EN 12620:2006 szabvány a durva (2 mm feletti) adalékanyagokra közvetlen fagyállóság vizsgálati módszerként az MSZ EN 1367-1:2007 szerinti fagyállóság és fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálatot írja elő. Ezt a vizsgálatot a DIN 1045-2:2008 szabvány (amely a DIN EN 206-1:2007 szabvány német nemzeti alkalmazási dokumentuma) az XF1 és XF3 környezeti osztályú betonok adalékanyagára írja elő.

A MSZ EN 1367-1:2007 szerinti fagyállóság vizsgálat elve, hogy az adott szemnagyságú adalékanyag légköri nyomáson vízzel telített vizsgálati adagjait lezárt fedelű dobozban, desztillált vízzel borítva, 10 fagyás-olvadás ciklusnak kell kitenni. (Az előírt 10 ciklus a hazai mérsékeltövi kontinentális éghajlati körülmények között nem elegendő.) A ciklus 4 órán át tartó (-17,5 ± 2,5) °C hőmérsékleten való, víz alatt történő fagyasztásból, utána (20 ± 3) °C hőmérsékletű vízfürdőben való felolvasztásból, és köztük felmelegítési és lehűtési szakaszokból áll. A vizsgálat ciklus ideje 24 óra. A hűtőszekrényt a hűtött felület közepén álló lezárt doboz közepének hőmérséklete segítségével kell szabályozni. A váltakozó fagyasztás-olvasztás befejezése után a kőanyaghalmaz változásait (repedésképződés, aprózódás, adott esetben szilárdságváltozás) meg kell vizsgálni. Veszteségnek az alsó szemnagysághatár felező szitáján áthullott vizsgálati anyagot kell tekinteni. A fagyállósági osztályok aprózódási veszteségre vonatkozó határértékei 1, 2 és 4 tömeg%.

Ha az adalékanyagból olvasztósó hatásának kitett szerkezet készül, akkor az MSZ EN 12620:2006 szabvány ajánlását követve indokolt a fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálatot az MSZ EN 1367-1:2007 szabvány B mellékletében jelzett, 1 %-os nátrium-klorid oldat vagy telített karbamid oldat alkalmazásával elvégezni. Ennek eredményére nincsenek követelmény értékek, illetve osztályok előírva, a vízben történő fagyasztáshoz tartozó követelmények és osztályok nem érvényesek. Az 1 %-os nátrium-klorid oldat és 10 ciklus alkalmazásával végzendő fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálat részletes leírását MSZ EN 1367-6:2009 szabványtervezet tartalmazza (lásd még DIN EN 1367-6:2008). Megjegyezzük, hogy *a legnagyobb fagykárosodást nem az 1 %-os, hanem a 3 %-os nátrium-klorid oldat okozza,* ahogy azt a betonok vizsgálata során alkalmazzák is, *a 10 fagyasztási ciklus pedig hazai időjárási viszonyaink közepette kevés.*

Az MSZ EN 12620:2006 szabvány a durva (2 mm feletti) betonadalékanyagokra közvetett fagyállóság vizsgálati módszerként az MSZ EN 1367-2:1999 szerinti magnéziumszulfát oldatos kristályosítási vizsgálatot írja elő. Ezt a vizsgálatot a DIN 1045-2:2008 szabvány szerint az XF2 és XF4 környezeti osztályú betonok adalékanyaga esetén kell elvégezni..

Az MSZ EN 1367-2:1999 szerinti magnéziumszulfát oldatos kristályosítási vizsgálat 2 óra (20 ± 5) °C-on történő csepegtetésből, 23-25 óra (110 ± 5) °C-on való szárításból, 5 óra (20 ± 5) °C-on történő hűtésből, 17 óra (20 ± 2) °C-on való áztatásból áll. A ciklusidő (48 ± 2) óra, a ciklusok száma 5, a vizsgálat tehát 10 napig tart. A referencia vizsgálat szemnagysága 10 – 14 mm, és emiatt a referencia vizsgálat terméken általában nem alkalmazható. A termékek kristályosítási vizsgálatát *alternatív vizsgálattal* lehet végezni. Az alternatív magnézium szulfátos kristályosítási aprózódást a zúzottkő és zúzottkavics

termékek névleges felső méret (D) feletti és névleges alsó méret (d) alatti szemeinek eltávolítása után maradó vizsgálati mintán kell meghatározni az MSZ EN 1367-2:1999 szabvány szerint, annak B melléklete szellemében, mint azt az MSZ 4798-1:2004 szabvány előírja, a hazai termékfrakciók szemnagyságához igazítva.

A magnézium-szulfátos kristályosítási veszteség megengedett értékei a különböző osztályokban az MSZ EN 12620:2006 szabvány szerint rendre 18, 25 és 35 tömeg%, ez a követelmény nagyon laza. *Magyarországon* a betonadalékanyagként alkalmazott zúzottkövek és zúzottkavicsok esetén – beleértve a betonútépítéshez használtakat is (ÚT 2-3.601-2:2008) – az MSZ 4798-1:2004 szabvány NAD 5.2. táblázat szerinti szigorúbb követelmény értékek (legfeljebb 5, 10, 15 tömeg% stb.) érvényesek, amelyek teljesülését – a vevő ellenőrzési jogát nem sértve – *alternatív vizsgálattal*, tehát a mindenkori termékből előállított vizsgálati mintán kell meghatározni.

Cement megfelelősége

A MSZ 4798-1:2004 szabvány a fagyálló betonokhoz alkalmazható cementekre nem ad követelményt, de közli az EN 206-1:2000 szabvány svéd nemzeti alkalmazási dokumentumának (SS 137003:2002) ajánlását a CEM I és CEM II fajtájú cementek alkalmazására. (Az ajánlás a CEM III cementekre nem terjed ki.) A svéd ajánlás szerint fagyálló betonok készítéséhez legalább 42,5 szilárdsági osztályú cementet kell használni. A CEM I fajtájú „tiszta" portlandcementek valamennyi környezeti osztályban felhasználhatók a fagyálló betonok kötőanyagául. A CEM II fajtájú „heterogén" portlandcementeket tekintve, a svédek az XF1, XF2, XF3 fagyállósági környezeti osztályban bármely CEM II/A jelű portlandcement (kiegészítő anyag tartalom 6-20 tömeg%), az XF4 fagyállósági környezeti osztályban csak a savanyú pernye kiegészítő anyagos CEM II/A-V és a legfeljebb 0,5 tömeg% szerves-szén tartalmú, mészkőliszt kiegészítő anyagos CEM II/A-LL jelű cement alkalmazásával értenek egyet.

A DIN 1045-2:2008 szabvány az összes németországi cementfajtára részletes ajánlási/tiltási jegyzéket ad meg. A német szabvány F.3.1. táblázata szerint a CEM I fajtájú „tiszta" portlandcementek valamennyi környezeti osztályban felhasználhatók a fagyálló betonok készítéséhez. A CEM II fajtájú „heterogén" portlandcementek németországi alkalmazhatósága árnyaltabb. A CEM II/A-S és a CEM II/B-S jelű kohósalak-portlandcementek valamennyi környezeti osztályban felhasználhatók. A CEM II/A-V jelű pernye-portlandcementet az XF1 és XF3 környezeti osztályban, a CEM II/B-V jelű pernye-portlandcementet (kiegészítő anyag tartalom 21-35 tömeg%) csak az XF1 környezeti osztályban szabad alkalmazni. A CEM II/A-LL mészkő-portlandcement felhasználását valamennyi környezeti osztályban megengedik. A CEM II/A-M és a CEM II/B-M kompozit-portlandcementek alkalmazhatóságát a kiegészítő anyag kombinációktól teszik függővé. Úgy rendelkeznek, hogy a CEM II/A-M (S-LL) jelű (kohósalak + mészkőliszt) kompozit-portlandcement valamennyi fagyállósági környezeti osztályban, a CEM II/A M (V-LL) jelű (pernye + mészkőliszt) kompozit-portlandcement az XF1 és XF3 környezeti osztályban szabad felhasználni. Az ugyanilyen összetételű, de nagyobb kiegészítő tartalmú CEM II/B-M (S-LL) és CEM II/A M (V-LL) jelű kompozit-cementek felhasználását tiltják. A CEM III/A és a CEM III/B jelű kohósalakcementek alkalmazása Németországban az XF1, XF2, XF3 környezeti osztályban megengedett, az XF4 környezeti osztályban a CEM III/A fajtájú kohósalakcement használható akkor, ha a szilárdsági osztálya legalább 42,5, vagy ha legalább 32,5 R (nagy kezdőszilárdságú) és a kohósalaktartalma legfeljebb 50 tömeg%.

Német megállapítás, hogy növekvő kohósalaktartalom mellett csökken a légbuborékok hatékonysága, és fagyhatás esetén a légbuborékos beton hámlási vesztesége egyre jobban megközelíti a légbuborékképző adalékszer nélkül készült beton hámlási veszteségét (*Lohaus*, 2007). Légbuborékos beton esetén az XF4 környezeti osztályban CEM III/A 42,5 jelű kohósalakcementet szabad használni, de a betont a szokásosnál hosszabb ideig kell utókezelni.

Az osztrákok az ÖNORM B 4710-1:2007 szabvány NAD 10. táblázatában a CEM I és a CEM II/A fajtájú, nálunk is gyártott portlandcementek valamennyi fagyállósági környezeti osztályban való alkalmazását engedélyezik. Ugyancsak alkalmazható valamennyi környezeti osztályban a CEM II/B-S jelű kohósalak-portlandcement. A CEM II/B-V jelű pernye-portlandcementet feltétel nélkül csak az XF1 és az XF3 környezeti osztályban szabad felhasználni, az XF2 és XF4 környezeti osztályban pedig felhasználását a légbuboréktartalomra vonatkozó osztrák előírások teljesülésének igazolásához kötik. A CEM III/A fajfájú kohósalakcement használatát feltétel nélkül csak az XF1 és az XF3 környezeti osztályban engedik meg. A CEM III/A fajfájú kohósalakcement használata az XF2 és XF4 környezeti osztályban, valamint a CEM III/B fajfájú kohósalakcement használata valamennyi környezeti osztályban szintén a légbuboréktartalomra vonatkozó osztrák előírások teljesülésének igazolása esetén megengedett.

A svéd, német és osztrák ajánlásokat is figyelembe véve a hazánkban gyártott cementek közül fagy- és olvasztósó-álló betonok készítésére az XF1 és az XF2 környezeti osztályban a CEM I és a CEM II/A-S fajtájú, legalább 42,5 szilárdsági osztályú portlandcement, illetve kohósalak-portlandcement, az XF3 és az XF4 környezeti osztályban a CEM I fajtájú, legalább 42,5 szilárdsági osztályú portlandcement ajánlható.

Légbuborékképző adalékszer megfelelősége

A légbuborékképző adalékszerek ❖ a beton fagy- és olvasztósó-állóságát növelik, ezért alkalmazásuk az XF2 – XF4 környezeti osztályokban ajánlott (az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerint kötelező), pályabetonok építése során előírt. Alkalmazásuk elsősorban útpályaszerkezetek esetén elengedhetetlen, magas- és mélyépítési betonok fagyállósága légbuborékképzőszer nélkül is megoldható [XF2(BV-MI) és XF3(BV-MI) környezeti osztály]. Az XF3 és XF4 környezeti osztályú légbuborékképző adalékszer nélküli fagyálló betonokra a DIN 1045-2:2008 alternatívát ad.

Különleges hatásuk abban áll, hogy a betonban igen nagyszámú, kisméretű (átmérőjük kisebb, mint 0,3 mm) légbuborékot hoznak létre. A friss betonba légbuborékképzőszerrel bevitt légbuborékok a megszilárdult betonban is megmaradnak. A beton megfagyásakor a kapillárisokból kiszorított víz egy részét felveszik, és a képződő jégkristály-nyomást levezetik. A kapillárisokban megfagyó víz kitágulásának teret adnak, a kapillárisok megszakításával csökkentik a vízfelszívást, ezáltal a beton jégkristály-nyomás okozta szétrepedezésének veszélye lecsökken. Hasonló jelenség játszódik le a kikristályosodó olvasztósó kristály-nyomásának semlegesítésekor is.

Az adalékszerek légbuborékképző hatása hatékonyságuktól és adagolásuktól, a cement fajtájától, a beton összetételétől, konzisztenciájától (víztartalmától), hőmérsékletétől, keverési módjától függ. A légbuborékok mennyisége a betonban általában *növekszik*, ha például a légbuborékképző adalékszer adagolása nő, a 0,25/0,5 mm-es finom homok tartalom nő, a homok szemlakja szögletes, a cementtartalom kisebb, a légbuborékképzőszert a keverővízben feloldják, a betonba kötésgyorsítószert is adagolnak, a keverési idő mintegy 1,5 perc, a konzisztencia képlékeny (de nem önthető) a földnedves helyett stb., és általában *csökken*, ha például a 0,125 mm alatti szemek mennyisége nő, finomabb őrlésű a cement, a cement pernye- vagy kohósalaktartalma nő, a betonba késleltetőszert is adagolnak, az optimálisnál hosszabb a keverési idő, hosszú a szállítási vagy a bedolgozási idő, a nyári melegben stb. (*Erdélyi*, 1983)

A betonban képzett légbuborékok általában csökkentik a beton szilárdságát, kivéve, ha a képlékenyítő hatást a víz-cement tényező csökkentésére használjuk. Ez azonban általában csak viszonylag csekély levegőtartalom vagy sováynbetonok esetén lehetséges. A légbuborékképzőszer túladagolása a beton nyomószilárdságának jelentős csökkenését okozza. A légbuborékos beton kúszása mindig nagyobb, mint a légbuborékképzőszer nélkülié.

A légbuborékképző adalékszerek valamelyest képlékenyítenek és csökkentik a vízigényt is. Légbuborékképzőszer és képlékenyítő- vagy folyósítószer együttes alkalmazása során hatásvizsgálattal meg kell győződni arról, hogy a légbuborékképzés a képlékenyítő- vagy folyósítószerben lévő habzásgátló ellenére szavatolható, továbbá az adalékszerek és a cement összeférhetők.

Szivattyús szállításkor a légbuborékos friss betonban lévő jelentős mennyiségű levegő összenyomódása folytán a betonszivattyú hatékony működése, a légbuborékos beton szivattyúzhatósága a szállítási távolságtól függő mértékben romlik.

A beton kémiai hatásokkal szembeni ellenállását légbuborékképzőszerrel nem lehet növelni.

Ha az érdekelt felek a bedolgozott friss betonon mért vagy számított levegőtartalom kimutatásával nem elégszenek meg, vagy megegyeznek a fagy- és olvasztósó-állósági vizsgálat elhagyásában, vagy egyéb szempontok szólnak mellette, akkor a beton megfelelőségének igazolásához a megszilárdult beton próbatestből (vagy ritkán a kész szerkezetből vett magmintákból, ugyanis az értékeléshez ismerni kell a beton pontos összetételét is) kimunkált és megcsiszolt próbatesteken kell a légbuborékok távolsági tényezőjét ❖ és mennyiségét az MSZ EN 480-11:2006 szerinti sztereomikroszkópos vizsgálattal meghatározni.

Légbuborékképzős fagyálló beton esetén – a szilárd betonban, az MSZ EN 480-11:2006 szabvány szerint meghatározva – a távolsági tényező legfeljebb 0,22 mm, a bevitt, 0,3 mm-nél kisebb névleges átmérőjű hatékony légbuborékok (mikrolégbuborékok, jele: L300) mennyisége (jele: A_{300}) legalább 1,0 térfogat% (az XF2 és XF3 környezeti osztályban), illetve legalább 1,8 térfogat% (az XF4 környezeti osztályban) legyen.

Az MSZ EN 934-2:2009 adalékszer szabvány azt a légbuborékképző adalékszert tekinti megfelelőnek, amelynek hatására a légbuborékképzős friss beton levegőtartalma legalább 2,5 térfogat%-kal nagyobb, mint a légbuborékképző nélküli beton levegőtartalma, és a friss beton teljes levegőtartalma 4-6 térfogat%. Követelmény továbbá, hogy a légbuborékképzőszer a megszilárdult betonban – az MSZ EN 480-11:2006 szabvány szerint meghatározva – legfeljebb 0,20 mm távolsági tényezőt hozzon létre. Az MSZ EN 934-2:2009 szabvány szerint 28 napos korban a légbuborékképző adalékszerrel készült beton nyomószilárdságának el kell érnie a légbuborékképző adalékszer nélkül készített ellenőrző beton nyomószilárdságának 75 %-át.

Minthogy az XF2(BV-MI) és XF3(BV-MI) környezeti osztályú betonok légbuborékképző adalékszer nélkül készülnek, ezek fagy- és olvasztósó-állóságát az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszát, vagy esetleg más, megállapodás szerinti szabványt (például ÖNORM B 3303:2002) követő vizsgálatokkal igazolni kell. Az XF2(BV-MI) és XF3(BV-MI) környezeti osztályban a megszilárdult beton fagy- és olvasztósó-állóság, illetve fagyállóság vizsgálata nem hagyható el.

<u>Mikroléggyöngy („előregyártott légbuborék”) alkalmazása</u>

Ha a légbuborékképzős beton előállítása nehézségekbe ütközik (például száraz eljárású lövellt beton esetén), akkor a beton fagyállóságát szilárdság csökkenés nélkül mikroléggyöngy (németül: Mikrohohlkugel, rövidítve: MHK) adagolásával lehet javítani. A mikroléggyöngy héja vékony műanyagfilm, szemnagysága 0,01-0,06 mm, adagolása 0,7-0,8 térfogat%. A rendkívül könnyű gyöngyszemeket nehéz bekeverni, amit megkönnyítendő vizes pép alakjában műanyagzacskóban forgalmazzák. Adagoláskor figyelembe kell venni, hogy hosszabb keverési idő alatt a gyöngyszemek egy része sérülhet, kipukkadhat. Hátránya, hogy beszerzési költsége jelenleg még magas. [*Springenschmid*, 2007]

<u>Szilikapor alkalmazása</u>

A szilikapor ❖ kémiailag kevesebb, fizikailag több vizet köt meg, aminek következtében a beton víztartalma és fagyérzékenysége megnő.

A beton fagy- és olvasztósó-állóságának vizsgálata

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány kétféle fagyállóság, ill. fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálatot ismer: vagy a beton belső szerkezeti sérülését („A" eset), vagy a beton felületi hámlását („B" eset) vizsgálja. Az „A" eset az MSZ EN 12371:2002 szabványt követi, a „B" eset hasonló az MSZ EN 1338:2003 szabvány D mellékletében leírt eljáráshoz.

A fagyállóságot, ill. a fagy- és olvasztósó-állóságot az MSZ 4798-1:2004 szabvány és a BV-MI 01:2005 műszaki irányelv szerint a következőképpen kell vizsgálni és értékelni, amelyhez megjegyzést is fűzünk:

- Az XF1 és az XF3 környezeti osztály esetén, ahol csak fagyhatás éri a betont, – ha a fagyállóságot nem közvetett módon a betonösszetétel határértékeivel írták elő, akkor – a fagyállóságot együtt a „referencia" betonnal, az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„A"* esete szerint kell megvizsgálni és értékelni. *Véleményünk szerint* a betonösszetétel határértékeivel történő előírás csak az XF1 környezeti osztályban engedhető meg;
- Úgy véljük, hogy az XF3 környezeti osztályban a fagyállóság vizsgálatot az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„A"* esete szerint el kell végezni, ha a légbuborék szerkezetet (légbuborék eloszlás és távolsági tényező) nem határozzák meg;
- Az XF2 és az XF4 környezeti osztály esetén, ahol fagy- és olvasztósó-hatás éri a betont, – ha a fagy- és olvasztósó-állóságot nem közvetett módon a betonösszetétel határértékeivel írták elő, akkor – a fagy- és olvasztósó-állóságot az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„B"* esete szerint kell megvizsgálni és értékelni. Ha megegyeznek a fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálat elhagyásában, és a fagy- és olvasztósó-állóságot közvetett módon a betonösszetétel határértékeivel írták elő, akkor a szilárd beton légbuborék eloszlását és távolsági tényezőjét kell meghatározni az MSZ EN 480-11:2006 szerint. *Véleményünk szerint* az XF2 és XF4 környezeti osztályban nem elegendő a fagy- és olvasztósó-állóságot közvetve a betonösszetétel határértékeivel előírni, hanem el kell végezni az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„B"* esete szerinti vizsgálatot, amely az XF2 környezeti osztály esetén elhagyható, ha a légbuborék szerkezetet meghatározzák. Az XF4 környezeti osztályban ajánlott meghatározni a légbuborék szerkezetet is;
- Az XF2(BV-MI) környezeti osztály esetén a fagy- és olvasztósó-állóságot az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„B"* esete szerint kell megvizsgálni és értékelni. A fagy- és olvasztósó-állóságot közvetett módon a betonösszetétel határértékeivel nem szabad előírni, hanem a fenti vizsgálatot el kell végezni;
- Az XF3(BV-MI) környezeti osztály esetén a fagyállóságot együtt a „referencia" betonnal, az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„A"* esete szerint kell megvizsgálni és értékelni. A fagyállóságot közvetett módon a betonösszetétel határértékeivel nem szabad előírni, hanem a fenti vizsgálatot el kell végezni.

A fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálatának rendje tehát javaslatunk szerint az *1. táblázat* szerinti legyen. Az *1. táblázatban* javasolt vizsgálati rend érvényre juttatásához az MSZ 4798-1:2004 szabvány átdolgozása lenne szükséges.

A beton fagy- és olvasztósó-állóságának követelménye az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszában található. A fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálathoz 100 m^3 beton-térfogatonként, vizsgálatonként legalább 1 db, de tételenként legalább 3 db próbatestet kell készíteni. A fagyállóság vizsgálathoz szükséges referencia próbatestek darabszáma ugyanennyi kell, hogy legyen.

Az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„A" esete* szerint, ha a beton fagynak ki van téve, de olvasztósó hatása nem éri (azaz környezeti osztálya XF3), akkor a megszilárdult

beton fagyállóságát legalább 28 napos, de legfeljebb 35 napos korú és vízzel telített próbatesteken, légtérben történő fagyasztással és víz alatti olvasztással kell vizsgálni az MSZ EN 12371:2002 szabvány módszerét alkalmazva (*2. táblázat*). Ezt az eljárást váltotta fel a „belső szerkezeti fagykárosodásokat" vizsgáló európai eljárás, amelyet európai műszaki jelentés (MSZ CEN/TR 15177:2009) formájában tettek közzé.

1. táblázat: A fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálatának rendje (javaslat)

Környezeti osztály	**Olvasztósó hatás éri a betont**	**A beton felülete**	**Vizsgálati rend**
XF1	Nem	Függőleges	Megengedhető a betonösszetétel határértékeivel történő előírás
XF2 ($XF2_{LP}$)	Igen	Függőleges	Fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálat az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„B"* esete szerint, amely elhagyható, ha a légbuborék szerkezetet meghatározzák
XF3 ($XF3_{LP}$)	Nem	Vízszintes	Fagyállóság vizsgálat az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„A"* esete szerint, amely elhagyható, ha a légbuborék szerkezetet meghatározzák
XF4 ($XF4_{LP}$)	Igen	Vízszintes	Fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálat az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„B"* esete szerint és ajánlott meghatározni a légbuborék szerkezetet is
XF2(BV-MI), ill. XF2(H)	Igen	Függőleges	Fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálat az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„B"* esete szerint
XF3(BV-MI), ill. XF3(H)	Nem	Vízszintes	Fagyállóság vizsgálat az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„A"* esete szerint

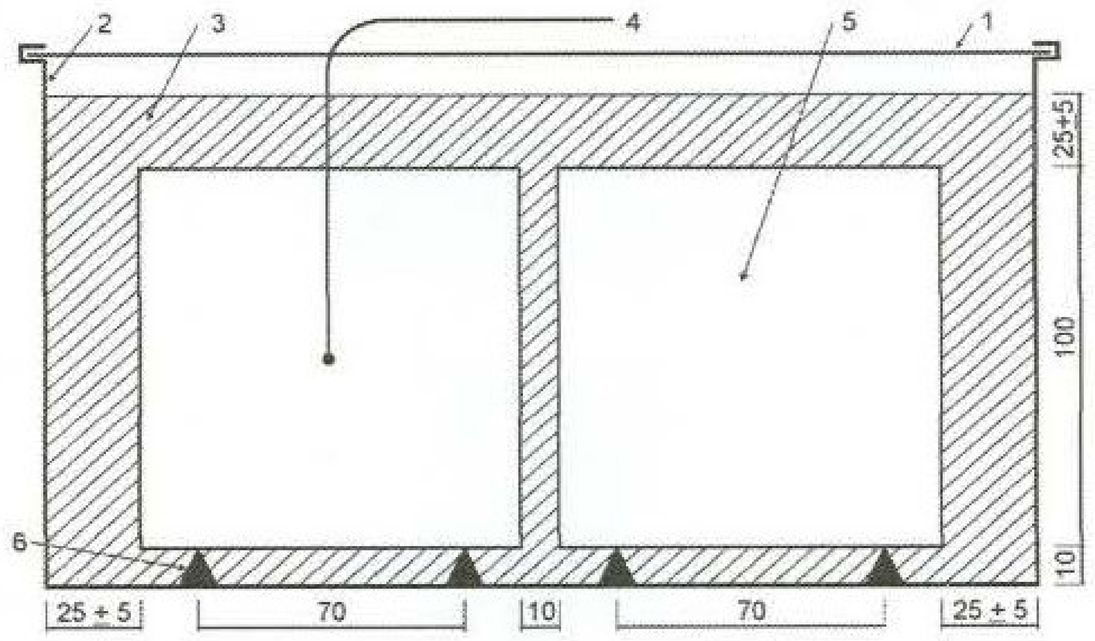
Az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.6. szakaszának *„B" esete* szerint (az MSZ 1338:2003 szabványt követve), ha a beton fagynak és olvasztósó hatásának is ki van téve (azaz környezeti osztálya XF2 vagy XF4), akkor a megszilárdult beton fagy- és olvasztósó-állóságát ugyancsak legalább 28 napos, de legfeljebb 35 napos korú és vízzel telített, és öt oldalán gumiréteggel körülragasztott, a vizsgált felületen túlnyúló peremmel körülhatárolt, a peremen belül 3 százalékos, 3 mm mélységű nátrium-klorid oldattal feltöltött próbatesteken kell, ún. „hámlasztásos" (vagy „felületi mállási") eljárással vizsgálni. A peremes hámlasztásos vizsgálatot a jövőben a prEN 12390-9:2002 szabványtervezetet felváltó, a CEN/TS 12390-9:2006 európai műszaki előírás honosításával bevezetett MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szabványban szereplő referencia módszer alkalmazásával kell végezni. A peremes hámlasztásos vizsgálat hazai tapasztalatok szerint túlzottan erős hatása folytán elsősorban összehasonlító jelleggel alkalmazható.

Az MSZ CEN/TS 12390-9:2007, MSZ EN 12371:2002 és MSZ EN 1338:2003 szabvány szerinti fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálatok jellemzőit a *2. táblázatban* hasonlítjuk össze.

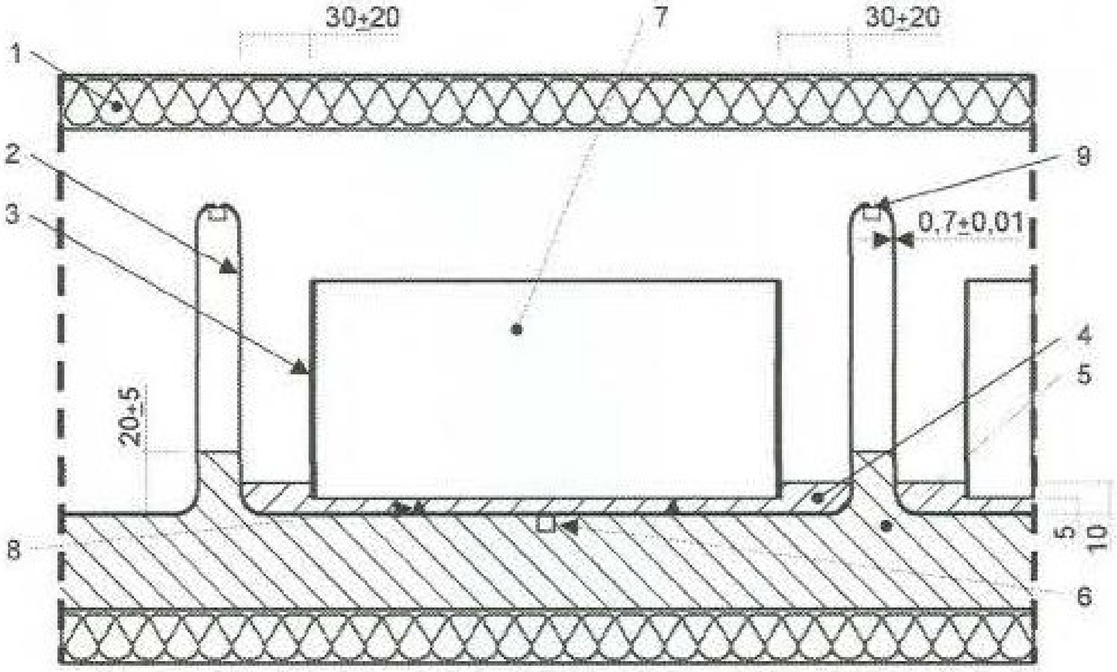
Az MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szabványban egy referencia (*peremes hámlasztás*) és két alternatív (*bemerítéses leválási és kapilláris felszívásos hámlasztási*) fagyasztási vizsgálati módszer található. A módszerek mind ionmentes vízzel, mind nátrium-klorid oldattal alkalmazhatók. A *kapilláris felszívásos alternatív vizsgálat* során a próbatesteket egyirányú kapillárisfelszívásnak teszik ki, és ha a fagyasztóközeg ionmentes víz, *CF-vizsgálatnak*

(**C**apillary suction of water and **F**reeze thaw test), ha nátrium-klorid oldat, *CDF-vizsgálatnak* (**C**apillary suction of **D**eicing solution and **F**reeze thaw test) nevezik. (A kapilláris felszívásos alternatív CDF-vizsgálat a bemerítéses alternatív vizsgálatnál szigorúbb, mert a kapillárisokba felszívódó sóoldat párolgásával a nátrium-klorid a pórusokban feldúsul és repesztőhatása növekszik.) A fagyasztási-olvasztási ciklusok száma általában 56, kivéve a kapilláris felszívásos alternatív vizsgálatot, ha a fagyasztóközeg nátrium-klorid oldat (CDF-vizsgálat), mely esetben a ciklusszám 28. Megegyezés szerint vagy a referencia módszert, vagy a két alternatív módszer egyikét, kétség esetén mindig a referencia módszert kell alkalmazni. A három vizsgálati módszerrel kapott eredmény között nincs összefüggés. A peremes hámlasztás referencia módszere nagy hasonlóságot mutat az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerinti hámlasztásos, „B" módszerrel. A szabvány követelmény értéket nem tartalmaz, irodalmi ajánlások alapján (*Setzer, 1990)* fagy- és olvasztósó-állónak tekintik a betont, ha a CDF-vizsgálat során 28 fagyasztási-olvasztási ciklus után a hámlási veszteség legfeljebb 1500 g/m^2. Ez a követelmény csak laboratóriumi próbatestek esetén érvényes, kifúrt magminták esetén (a beton kora, igénybevétele stb. miatt) nem alkalmazható (*Lang* 2003; *Bollmann – Lyhs*, 2005; *Bilgeri* et al., 2007).

Az MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szabvány szerinti bemerítéses leválási kockavizsgálat (alternatív-módszer) tartálya a *4. ábrán*, a kapilláris felszívásos hámlasztási CF/CDF alternatív vizsgálat alapelrendezése az *5. ábrán* látható.



4. ábra:
Az MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szabvány szerinti bemerítéses kockavizsgálat (alternatív-módszer) tartálya próbatestekkel
Jelmagyarázat: 1) Csúszófedél,
2) Tartály,
3) Fagyasztóközeg,
4) Hőmérő a próbakocka közepén,
5) Próbakocka,
6) 10 mm magas alátámasztás



5. ábra:
Az MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szabvány szerinti CF/CDF vizsgálat kapilláris felszívásos hámlasztással (alternatív módszer) alapelrendezése
Jelmagyarázat: 1) Tartály fedele,
2) Vizsgálótartály, 3) Próbatest oldalainak szigetelése,
4) Fagyasztóközeg, 5) Hűtőfolyadék,
6) Hőmérő a hűtőfolyadékban a középső tartály közepe alatt, a vizsgálótartály aljára erősítve,
7) Próbatest,
8) 5 mm magas alátámasztás,
9) Támasztékok a vizsgálótartályok beállításához

2. táblázat: Fagy- és olvasztósó-állóság szabványos vizsgálatainak összehasonlítása

Szabvány	MSZ CEN/TS 12390-9:2007			MSZ 4798-1:2004	
				„A" eset (MSZ EN 12371:2002)	„B" eset (MSZ EN 1338:2003)
Vizsgálati módszer	REFERENCIA	ALTERNATÍV (lásd *4. ábra*)	ALTERNATÍV CF/CDF (lásd *5. ábra*)	NORMATIV Előírás	NORMATIV Előírás
Vizsgálat jellege	Peremes hámlasztás	Bemerítéses leválás	Kapilláris felszívásos hámlasztás	Bemerítéses leválás	Peremes hámlasztás
Fagyasztóközeg	3 mm mély réteg: ionmentes víz vagy 3 %-os NaCl oldat	Próbatestet (25±5) mm-rel ellepő ionmentes víz vagy 3 %-os NaCl oldat	10 mm mély réteg: ionmentes víz vagy 3 %-os NaCl oldat	Fagyasztás levegőn, olvasztás vízben	3 mm mély réteg: 3 %-os NaCl oldat (esetleg csapvíz, lásd az „A" esetet)
Eredeti próbatest mérete	150 mm-es kocka	100 mm-es kocka	I-alakú PTFE (pl. Teflon) betéttel függőlegesen két részre osztott, 150 mm-es kockasablonban készülő, kb. 140·150 mm vizsgálati felületű, (70±5) mm magas próbatest	Vízzel telített 100 vagy 150 mm-es kocka, vagy Ø150·150 vagy Ø100·100 mm-es henger	Legalább 20 napos 150 mm-es kocka, amelynek felezőjéből ki lehet vágni az 50·150·150 mm-es vizsgálati próbatestet
Próbatestek száma	4 db kockából kivágott 1-1 próbatest	4 db kocka, két tartály 2-2 kockával	5 db próbatest	3 db vízzel telített fagyasztandó és 1 db nem fagyasztott referencia próbatest hőmérsékletmérésre	3 db próbatest
Vizsgálati felület	A vizsgálati felület az eredeti próbatest felezősíkjával azonos vágott felület	Mind a hat oldal érintkezik a fagyasztóközeggel	A sablonban a függőleges PTFE anyagú elválasztó lemezzel érintkezett, kb. 140·150 mm-es felület	Mind a hat oldal érintkezik a fagyasztóközeggel	7500-25000 mm^2 közötti felület
Fedővel zárható, rozsdamentes tartály mérete	—	Széles: (120±15) mm Hossz: (260±15) mm Magas: (150±15) mm Falvastagság: kb. 1 mm	Alakja speciális. A próbatest és a tartály függőleges fala között (30±20) mm hely legyen. Falvastagság: (0,7±0,01) mm	—	—

2. táblázat folytatása

Szabvány	MSZ CEN/TS 12390-9:2007			MSZ 4798-1:2004	
				„A” eset (MSZ EN 12371:2002)	„B” eset (MSZ EN 1338:2003)
Vizsgálati módszer	REFERENCIA	ALTERNATÍV (lásd *4. ábra*)	ALTERNATÍV CF/CDF (lásd *5. ábra*)	NORMATIV Előírás	NORMATIV Előírás
Próbatestek előkészítése	21 nap: 2 db (50±2) mm vastagságú, azaz 50·150·150 mm-es próbatestet kell kivágni minden eredeti próbatestből. (25±1) nap: A (vágott) vizsgálati felület kivételével minden oldalra gumilemezt kell ragasztani. Perem-magasság: (20±1) mm. 28 nap – (72±2) óra: (20±2) °C-os, 3 mm magas (kb. 67 ml) ionmentes vízréteget kell önteni a peremek közé. Vizsgálat megkezdése előtt: A próbatest 5 oldalára (20±1) mm vastag polisztirolréteget kell ragasztani. Vizsgálat kezdetén a fagyasztó-kamrába helyezés (31 nap) előtt legalább 15 perccel: Az ionmentes vizet ki kell cserélni (20±2) °C-os, 3 mm magas (kb. 67 ml) fagyasztóközeggel , és a próbatest polisztirol falát polietilén-lemezzel le kell takarni	27 nap: Próbatest lemérés után a tartályba kerül, és rá kell önteni a fagyasztóközeget, úgy, hogy a kockát (25±5) mm-rel ellepje. 28 nap: Meg kell határozni a kocka tömegét, és ki kell számítani a felvett fagyasztóközeg tömegét. Fagyasztókamrába helyezés: 28 nap	21-26 nap között: A próbatest oldalsó lapjait (4 oldal) vagy befedjük alumínium-fóliával és azt gumiragasztóval rögzítjük, vagy oldószer nélküli epoxi-gyantával tömítjük. 28 nap: Ultrahangfürdőben eltávolítjuk a próbatestről a szennyeződéseket. A próbatestet a vizsgálótartályba tesszük az (5±0,1) mm magas alátámasztásokra, a vizsgálati felülettel lefelé. Ezután beöntjük a fagyasztóközeget úgy, hogy rétegvastagsága 10 mm legyen. (A szabvány 7.4. szakasz második bekezdésének és a 7.5. feletti része a) pontjának szövege hibás, a 8. ábra helyes.) 29-35 nap: 7 nap a fagyasztóközeg felszívására, majd kezdődik a fagyasztás	28-35 nap: A fagyasztás kezdete	28-35 nap között, 7 napon át: Klímakamrában kell tárolni. Ez alatt idő alatt a próbatest 5 oldalára, – a vizsgált felület körül (20±2) mm magas peremmel – gumi réteget kell ragasztani. A peremek közé (5±2) mm magasan (20±2) °C-os vizet kell önteni, és klímaszekrénybe kell tenni (72±2) óra hosszára. A fagyasztást 28-35 nap között kell elkezdeni. A vizsgálat megkezdése előtt a próbatest 5 oldalára (20±1) mm vastag polisztirolréteget kell ragasztani. Vizsgálat kezdetén a fagyasztókamrába helyezés előtt 15-30 perccel a vizet ki kell cserélni (20±2) °C-os, (5±2) mm magas 3 %-os NaCl oldattal , és a próbatest polisztirol falát polietilén-fóliával le kell takarni

2. táblázat folytatása

Szabvány	MSZ CEN/TS 12390-9:2007			MSZ 4798-1:2004	
				„A” eset (MSZ EN 12371:2002)	„B” eset (MSZ EN 1338:2003)
Vizsgálati módszer	REFERENCIA	ALTERNATÍV (lásd *4. ábra*)	ALTERNATÍV CF/CDF (lásd *5. ábra*)	NORMATIV Előírás	NORMATIV Előírás
Próbatestek tárolása	0-(24±2) óra: sablonban; (24±2) óra – 7 nap: (20±2) °C csapvíz alatt 7 nap – vizsgálat kezdetéig: Klímakamrában, ahol kiszárad	0-(24±2) óra: sablonban; (24±2) óra – 7 nap: (20±2) °C csapvíz alatt 7 nap – 27 nap: Klímakamrában, ahol kiszárad	0-(24±2) óra: sablonban; (24±2) óra – 7 nap: (20±2) °C csapvíz alatt 7 nap – 28 nap: Klímakamrában, ahol kiszárad	0-(24±2) óra: sablonban; (24±2) óra – 28 nap: Végig víz alatt tárolt, vízzel telített	0-(24±2) óra: sablonban; (24±2) óra – 28 nap: Végig víz alatt tárolt
Hőmérsékletmérés	Legalább egy próbatest felületén a fagyasztóközegben	A kocka közepén	A folyadékhűtésű kád hűtőfolyadékában, a középső tartály alatt	Próbatest közepén	A próbatest NaCl oldattal elárasztott felületén
Hőmérséklet	Legnagyobb °C: (+24) – (+16) Legkisebb °C: (-18) – (-22)	Legnagyobb °C: (+22) – (+18) Legkisebb °C: (-13) – (-17)	Legnagyobb °C: (+21) – (+19) Legkisebb °C: (-19,5) – (-20,5)	Legnagyobb °C: (+5) – (+20) Legkisebb °C: (-12)	Legnagyobb °C: (+16) – (+24) Legkisebb °C: (-16) – (-20)
Teljes ciklusidő	24 óra	24 óra	12 óra	14 óra	24 óra
Ciklusok száma	56	56	CF vizsgálat: 56 CDF vizsgálat: 28	XF1 esetén: 50 XF3 esetén: 100	56
Olvasztás	Fagyasztókamrában fagyasztóközeggel a peremek között	A tartályokat a fagyasztóközegben lévő kockákkal és a (20±2) °C-os vizes kádba kell helyezni úgy, hogy a víz (20±5) mm-rel legyen a tartályok felső pereme alatt. Az olvasztási fázis ideje: 8 óra	Olvasztás alatt a próbatest a régi fagyasztóközegben áll, míg azt ki nem cseréljük friss folyadékra	Olvasztás (20±5)) °C-os vízben	Fagyasztókamrában fagyasztóközeggel a peremek között

2. táblázat folytatása

Szabvány	MSZ CEN/TS 12390-9:2007			MSZ 4798-1:2004	
				„A” eset (MSZ EN 12371:2002)	„B” eset (MSZ EN 1338:2003)
Vizsgálati módszer	REFERENCIA	ALTERNATÍV (lásd *4. ábra*)	ALTERNATÍV CF/CDF (lásd *5. ábra*)	NORMATIV Előírás	NORMATIV Előírás
Teendők a fagyasztás-olvasztás folyamata alatt. Megjegyzés: Valamennyi NaCl oldatos vizsgálat során tanácsos a leöntött oldatokat megelemezni a betonból kioldott alkotók meghatározása céljából	(7±1), (14±1), (28±1) és 56 fagyasztási ciklus után az olvasztási fázisban a lehámlott anyag összegyűjtése, kiszárítása (110±10) °C-on, tömegmérése, és a fagyasztóközeg cseréje	(7±1), (14±1), (28±1) és 56 fagyasztási ciklus után az olvasztási fázisban a levált anyag összegyűjtése, a fagyasztás előtt új fagyasztóközeggel való feltöltése. Tartályok cseréje hetente, elforgatásuk és helycseréjük ciklusonként	CF vizsgálat: (14±1), (28±1), (42±1) és 56 fagyasztási ciklus után. CDF vizsgálat: (4±1), (6±1), (14±1) és 28 fagyasztási ciklus után mialatt a hőmérséklet 15 °C felett van. A vizsgáló-tartályt 3 percre bemerítjük az ultrahangfürdőbe. A lehámlott anyag összegyűjtése, kiszárítása (110±10) °C-on, tömegmérése, és a fagyasztóközeg cseréje	Legfeljebb 14 ciklusonként el kell forgatni a próbatestet 180°-kal	7 vagy 14 ciklusonként össze kell gyűjteni a lemállott részeket, és cserélni kell a NaCl oldatot
Megjegyzés	A kockából kivágott próbatest egyikét ionmentes vízzel, a párját NaCl oldattal lehet vizsgálni. Így egy fagyasztóközegben 3 próbatestet lehet vizsgálni	—	CF: **C**apillary suction of water and **F**reeze thaw test (Fagyasztás-olvasztás ionmentes vízben kapilláris felszívás mellett) CDF: **C**apillary suction of **D**eicing solution and **F**reeze thaw test (Fagyasztás-olvasztás NaCl oldatban kapilláris felszívás mellett)	Az olvasztósó hatásának ki nem tett beton fagyállósága a „B” módszerrel is vizsgálható, ha a fagyasztóközeg víz. Ebben az esetben az elfogadási feltétel 56 ciklus után: Tömegveszteség legfeljebb: XF1: átl.: 250, max.: 350 g/m^2 XF3: átl.: 125, max.: 175 g/m^2	—

2. táblázat folytatása

Szabvány	MSZ CEN/TS 12390-9:2007			MSZ 4798-1:2004	
				„A” eset (MSZ EN 12371:2002)	„B” eset (MSZ EN 1338:2003)
Vizsgálati módszer	REFERENCIA	ALTERNATÍV (lásd *4. ábra*)	ALTERNATÍV CF/CDF (lásd *5. ábra*)	NORMATIV Előírás	NORMATIV Előírás
ALTERNATÍV vizsgálati lehetőség	- Más a kiindulási próbatest mérete, de a vastagsága mindig 50 mm legyen. - Vizsgált felület nem feltétlenül vágott. - NaCl helyett más olvasztószer. - Ciklusok száma megválasztható	- Más a kiindulási próbatest mérete, de a vastagsága és szélessége mindig 80-100 mm között legyen. - Más tárolási feltételek és korok. - NaCl helyett más olvasztószer. - Ciklusok száma megválasztható	- Más a kiindulási próbatest mérete, de a vastagsága mindig (70±5) mm legyen. - Más lehet az elválasztó lemezek helyzete, de akkor a próbatestet is másképp kell kialakítani. - Más tárolási feltételek és korok. - NaCl helyett más olvasztószer. - Ciklusok száma megválasztható	MSZ EN 12371:2002 szabvány az itt leírt általános „Technologische Prüfung (Verfahren A)” módszer mellett az „Identitätsprüfung (Verfahren B)” módszert is ismeri	—
Elfogadási határérték	—	—	CDF: 1500 g/m^2 A követelmény csak laboratóriumi próbatestek esetén érvényes	Tömegveszteség max.: 5 tömeg%, nyomószilárdság csökkenés legfeljebb 20%	Tömegveszteség max.: XF2: átl.: 500, max.: 700 g/m^2 XF4: átl.: 250, max.: 350 g/m^2

A fagyasztás–olvasztás hatására (modell-folyamat) a beton, ill. cementkő belső szerkezete (struktúrája) sérül, és ennek mértékét a beton „alaptulajdonságaira" (szilárdság, rugalmassági modulus stb.) roncsolásos és roncsolásmentes módszerrel lehet meghatározni. *Roncsolásos módszerként* – mint említettük – elsősorban a nyomószilárdság vizsgálatot alkalmazzák, de ajánlható az annál érzékenyebb hajlító-húzószilárdság vizsgálat is.

Roncsolásmentes módszer az ultrahang terjedési idő és a rezonancia-frekvencia mérés, amelyek eredményei a dinamikai rugalmassági modulus (E_{dyn}) változásáról adnak képet. „A fagyasztás során a mikro-repedések miatt a *Poisson*-szám megváltozik, ezért az ezt figyelembe vevő rezonancia-frekvenciás módszer megbízhatóbb, mint az ultrahangos eljárás. Amerikai kutatók rezonancia-frekvenciás méréssel mutatták ki, hogy a 350 – 400 kg/m^3 cementadagolású, légbuborékképzős kísérleti betonjaik kezdeti rugalmassági modulusa 300 fagyasztási ciklusig lényegében nem változott, de a légbuborékképző nélküli betonok nagy részének kezdeti rugalmassági modulusa 150 – 300 fagyasztási ciklus között az eredetinek 60 %-a alá esett. Svéd kutatók 40 – 140 N/mm^2 közötti nyomószilárdságú betonok fagyasztása során azt tapasztalták, hogy míg a légbuborékképző nélküli betonok önrezgésszáma 250 fagyasztási ciklus után kezdett csökkenni, és a megindult repedezés miatt a kezdeti rugalmassági modulus a kiindulásinak 80 %-ára csökkent, addig a légbuborékos betonok és az agyagkavics adalékanyagú könnyűbetonok rugalmassági modulusa 10 %-nál kevesebbet változott. A megfelelő pórusrendszerű könnyű-adalékanyag légbuborékrendszerként működik." (*Erdélyi*, 1996)

A beton belső szerkezete (struktúrája) fagyhatásra történő változásának (zavarának, sérülésének, károsodásának) vizsgálatával az MSZ CEN/TR 15177:2009 európai műszaki jelentés foglalkozik. A műszaki jelentés *Setzer* (2004) munkáján alapul. A fogalom-meghatározás szerint „belső szerkezeti zavar" vagy „belső szerkezetsérülés" alatt olyan repedések keletkezését kell érteni, amelyek kívülről nem láthatók, mégis a betontulajdonságok változását (pl. a dinamikai rugalmassági modulus csökkenését) okozzák. A műszaki jelentés kidolgozói úgy vélik, hogy a gyakorlatban előforduló fagyási-olvadási feltételeket egyetlen vizsgálati módszerrel modellezni nem lehet, ezért három eljárást tesznek közzé, amelyek különböző európai országokban beváltak, és mindig megfelelő eredményekre vezettek. Ezek az eljárások arra nem értek meg, hogy valamelyiküket referencia vizsgálatként jelöljék meg, ezért ha két laboratórium azonos betont vizsgál, akkor a vizsgálati módszerben és mérési eljárásban meg kell, hogy állapodjon. Követelmény értékek alkalmazásához módszerenként meg kell határozni a laboratóriumi vizsgálati eredmények és a beton gyakorlati állapota közötti összefüggést, ugyanis a három vizsgálati módszer eredménye között nincs szoros korreláció. Az MSZ CEN/TR 15177:2009 európai műszaki jelentés a hasáb-vizsgálatot, a lemez-vizsgálatot és a CIF-vizsgálatot (**C**apillary suction **I**nternal damage and **F**reeze thaw test) tartalmazza. Az MSZ CEN/TR 15177:2009 szerinti vizsgálatok alapvetően hasonlítanak az MSZ CEN/TS 12390-9:2007 szabvány szerinti fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálatokhoz, azzal a különbséggel, hogy ezekkel a vizsgálatokkal nem a fagyasztási ciklusok okozta tömegveszteséget, hanem a roncsolásmentes vizsgálatok eredményének változását, ill. esetenként a hosszméret-változást és kiegészítésként a vízfelvételt kell meghatározni. Ezeket a vizsgálatokat a fagyállóság vizsgálat előtt (kezdeti mérési eredmény), majd a (7 ± 1), (14 ± 1), (28 ± 1), (42± 1) és 56 olvasztási ciklust követően kell elvégezni.

A roncsolásmentes vizsgálatok relatív eredményének négyzete arányos a relatív dinamikai rugalmassági modulussal (*RDM*).

A relatív dinamikai rugalmassági modulus a *keresztirányú önrezgésszám* mérése esetén az *n*-edik olvasztási ciklus után:

$$RDM_{FF,n} = (f_n/f_0)^2 \cdot 100 \quad [\%]$$

ahol: f_n a keresztirányú önrezgésszám az *n*-edik olvasztási ciklus után, [Hz]
f_0 a kezdeti (az első fagyasztási ciklus előtt mért) keresztirányú önrezgésszám, [Hz]

A relatív dinamikai rugalmassági modulus az *ultrahang terjedési idejének* mérése esetén az *n*-edik olvasztási ciklus után:

$$RDM_{UPTT,n} = (t_{S,0}/t_{S,n})^2 \cdot 100 \quad [\%]$$

ahol: $t_{S,0}$ a kezdeti (az első fagyasztási ciklus előtt mért) ultrahang terjedési idő, [µs]
$t_{S,n}$ az ultrahang terjedési idő az *n*-edik olvasztási ciklus után, [µs]

Az MSZ CEN/TR 15177:2009 szerinti *hasáb-vizsgálat* során a sablonban készült 400·100·100 mm méretű próbahasábokat 1 napos korban ki kell zsaluzni, 7 napos korig műanyagfóliába csomagolva levegőn, majd kicsomagolva 7 napos kortól 28 napos korig víz alatt kell tárolni. A „*bemerítéses*" fagyállóság vizsgálatot a vízből való kiemelés után legkésőbb 2 órával el kell kezdeni, és az erre a célra készített próbatest közepén mért hőmérséklettel a fagyasztási diagramot követve kell végezni. A fagyasztóközeg ionmentes víz, a fagyasztási-olvasztási ciklusok száma 56, de több is lehet. A hullámokat elnyelő anyagra (pl. habanyagra) fektetett hasábokon keresztirányban a relatív önrezgésszám és hosszirányban a relatív ultrahang terjedési idő változását kell meghatározni az idő függvényében. A roncsolásmentes vizsgálatokkal egyidejűleg meg kell mérni a próbatestek vízfelvételét is.

Az MSZ CEN/TR 15177:2009 szerinti *lemez-vizsgálat* 150·150·50 mm méretű próbatestét 150 mm méretű, 1 napos korban kizsaluzott, 7 napos korig víz alatt, azt követően 28 napos korig klímaszekrényben tárolt próbakockából, 21 napos korban, a próbakocka lesimított felületére merőlegesen kell kivágni. A vizsgálati felület a kocka felezősíkjának vágott felülete. A kivágott próbatest alsó lapjára és oldalaira – a vizsgált 150·150 mm méretű, vágott lap kivételével – gumilapokat kell ragasztani, amelyek az oldalakon peremet képezve 20 mm-rel túlnyúlnak, és külső hőszigetelést kapnak. A „*peremes*" fagyállóság vizsgálat 28 napos korban, a vizsgált felület ionmentes vízzel, 72 órán át tartó telítésével kezdődik, és a fagyasztószekrényben folytatódik. A peremek közé kerülő fagyasztóközeg ionmentes víz vagy 3 %-os nátrium-klorid oldat, amelynek rétegvastagsága 3 mm. A hőmérsékleti diagramot a fagyasztóközegben, a vizsgált felület közepén mért hőmérséklettel kell követni. A fagyasztási-olvasztási ciklusok száma 56, de több is lehet. A hosszméret-változást (referencia-vizsgálat) három-pontos, mérőórás eszközzel, két szemben lévő oldallapra erősített mérőpont között kell vizsgálni. A keresztirányú önrezgésszámot (alternatív vizsgálat) a vizsgált 150·150 mm méretű felületen, az ultrahang terjedési időt (alternatív vizsgálat) két szemben lévő oldallap között kell megmérni, miközben a próbalemez habanyagon fekszik. A lemez-vizsgálat során a hosszméret-változást, a relatív keresztirányú önrezgésszám és a relatív hosszirányú ultrahang terjedési idő változását kell meghatározni az idő függvényében.

Az MSZ CEN/TR 15177:2009 szerinti *CIF-vizsgálat* próbatesteinek mérete, tárolása és a fagyállóság vizsgálat lényegében megegyezik az MSZ EN 12390-9:2007 szabvány szerinti „*kapilláris felszívásos*" vizsgálattal. A fagyasztás a 28 napos korban kezdett, 7 napig tartó, (20 ± 2) °C hőmérsékleten végzett folyadék-felszívást követően kezdődik. A fagyasztóközeg a vizsgálótartályban lévő 10 mm rétegvastagságú ionmentes víz vagy 3 %-os nátrium-klorid oldat. A CIF-vizsgálat során az ultrahang terjedési időt (referencia-vizsgálat) a pl. plexi

tartóba helyezett próbatest két-két szemben lévő oldallapja között, a hosszméret-változást (alternatív vizsgálat) két szemben lévő oldallap között kell megmérni. A keresztirányú önrezgésszám (alternatív vizsgálat) vizsgálatához a próbatestet a vizsgált 140·150 mm méretű vizsgálati felülettel lefele a hullámnyelő habanyagra kell fektetni, és a keresztirányú önrezgésszámot a felső felületen kell vizsgálni. A CIF-vizsgálat során a hosszméret-változást, a relatív keresztirányú önrezgésszám és a relatív hosszirányú ultrahang terjedési idő változását kell meghatározni az idő függvényében. A roncsolásmentes vizsgálatokkal egyidőben meg kell mérni a próbatestek vízfelvételét is.

Végül a betonok fagy- és olvasztósó-állóságával kapcsolatban megjegyezzük, hogy az – mint ismeretes – a beton áteresztőképességének is függvénye. A beton áteresztőképességéről, ill. a sóoldat kapilláris felszívódásáról a kloridionok behatolásával szembeni ellenállóképesség ASTM C 1207:1997 szabvány szerinti 6 órás gyorsvizsgálata adhat tájékoztatást.

A felületi bevonat fagy- és olvasztósó-állóság vizsgálata

A *betonszerkezetek védelmére és javítására* szolgáló cement (CC: Cement-Concrete), műanyag-cement (PCC: Polimer-Cement-Concrete) és műanyag (PC: Polimer-Concrete) kötőanyagú finomhabarcs, habarcs és beton felületi bevonatok és rendszerek fagy-, olvasztósó- és hőállóságának vizsgálatára külön szabványokat dolgoztak ki (MSZ EN 13687 sorozat). A próbatestek előírt módon szilárdított felületi bevonatokkal (feltehetően a vizsgálati felületen) ellátott 300·300·100 mm méretű, MSZ EN 1766:2000 szerinti referencia betonból készített lapok, amelyeket a vizsgálat előtt a hátoldal és az oldallapok folyadékfelvétele ellen a vizsgált 300·300 mm méretű felület kivételével hőre szilárduló gyantával kell bevonni.

A próbatestek száma három, ebből egy referencia próbatest. A vizsgálatok ciklusszáma 10, a ciklusokat az MSZ EN 1504-2:2005, ill. MSZ EN 1504-3:2006 szabványban előírtak szerint egyszer kell megismételni. (Az előírt 20 ciklus a hazai időjárási körülmények között nem feltétlenül elegendő.) A próbatesteknek a vizsgálatot meghibásodás és elváltozás nélkül kell viselniük. A fagyasztási-olvasztási ciklusok után a próbatesteket laboratóriumi körülmények között [(21 ± 2) °C levegő hőmérséklet és (60 ± 10) % relatív levegő nedvességtartalom] legalább 7 napon át kell tárolni, majd ezután meg kell vizsgálni a felületi bevonat, ill. rendszer tapadó-húzószilárdságát az MSZ EN 1542:2000 szabvány szerint. Ha a bevonat a gyakorlatban függőleges felületre kerül, akkor a tapadó-húzószilárdság átlaga legalább 0,8 N/mm^2, legkisebb értéke legalább 0,5 N/mm^2; ha terhelés nélküli vízszintes felületre kerül, akkor az átlag legalább 1,0 N/mm^2, a legkisebb érték legalább 0,7 N/mm^2; ha terhelt vízszintes felületre kerül, akkor az átlag legalább 1,5 N/mm^2, a legkisebb érték legalább 1,0 N/mm^2 kell legyen.

Az MSZ EN 13687-1:2002 szabvány a felületi bevonattal ellátott beton próbatestek olvasztósó oldatba merítéses fagy- és olvasztósó-állósági vizsgálatával foglalkozik. A fagyasztás (-15 ± 2) °C hőmérsékletű telített nátrium-klorid oldatban, az olvasztás (21 ± 2) °C hőmérsékletű vízben történik. Mindkét fázis hossza 2 óra, a ciklusidő tehát 4 óra.

MSZ EN 13687-3:2002 szabvány a felületi bevonattal ellátott beton próbatestek fagy- és hőállósági vizsgálatát írja le, olvasztósóoldat hatása nélkül. A vizsgálat referencia-eszköztára (-15 ± 2) °C hőmérsékletű fagyasztó légtér, (21 ± 2) °C hőmérsékletű vízfürdő és (60 ± 2) °C hőmérsékletű melegítő légtér előállítására alkalmas berendezésekből áll, amelyek között a próbatesteket kézzel mozgatják. A vizsgálat programozható fagyasztó-temperáló-fűtő berendezéssel is végezhető. A ciklus kézi mozgatású vizsgálat esetén a következő fázisokból áll: 2 óra (21 ± 2) °C hőmérsékletű vízben, 4 óra fagyasztás (-15 ± 2) °C hőmérsékletű légtérben, 2 óra (21 ± 2) °C hőmérsékletű vízben, 16 óra hevítés (60 ± 2) °C hőmérsékletű légtérben. A ciklusidő tehát 24 óra. Programozható berendezés alkalmazásakor a lehűtés és felmelegítés időigénye miatt a hevítés ideje 10 óra, a fagyasztás és felhevítés között a vízfürdő ideje 75 perc, a hőntartás után 105 perc. A ciklusidő ez esetben is 24 óra.

Felhasznált irodalom

MSZ 4798-1:2004	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség. Az MSZ EN 206-1 és alkalmazási feltételei Magyarországon
MSZ EN 206-1:2002	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség (Módosítások: MSZ EN 206-1:2000/A1:2004 és MSZ EN 206-1:2000/A2:2005)
MSZ EN 480-11:2006	Adalékszerek betonhoz, habarcshoz és injektálóhabarcshoz. Vizsgálati módszerek. 11. rész: A megszilárdult beton légbuborék-jellemzőinek meghatározása
MSZ EN 934-2:2009	Adalékszerek betonhoz, habarcshoz és injektálóhabarcshoz. 2. rész: Betonadalékszerek. Fogalommeghatározások, követelmények, megfelelőség, jelölés és címkézés
MSZ EN 1097-6:2001	Kőanyaghalmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata. 6. rész: A testsűrűség és a vízfelvétel meghatározása (Módosítás: MSZ EN 1097-6:2000/A1:2006)
MSZ EN 1338:2003	Beton útburkoló elemek. Követelmények és vizsgálati módszerek
MSZ EN 1367-1:2007	Kőanyaghalmazok termikus tulajdonságainak és időállóságának vizsgálata. 1. rész: A fagyállóság meghatározása
MSZ EN 1367-2:1999	Kőanyaghalmazok termikus tulajdonságainak és időállóságának vizsgálati módszerei. 2. rész: Magnézium-szulfátos eljárás
MSZ EN 1367-6:2009	Kőanyaghalmazok termikus tulajdonságainak és időállóságának vizsgálatai. 6. rész: A fagyállóság meghatározása só (NaCl) jelenlétében
MSZ EN 1504-2:2005	Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Fogalommeghatározások, követelmények, minőség-ellenőrzés és megfelelőségértékelés. 2. rész: A beton felületvédelmi rendszerei
MSZ EN 1504-3:2006	Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Fogalommeghatározások, követelmények, minőség-ellenőrzés és megfelelőségértékelés. 3. rész: Szerkezeti és nem szerkezeti javítás
MSZ EN 1542:2000	Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Vizsgálati módszerek. A tapadószilárdság meghatározása leszakítással
MSZ EN 1766:2000	Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Vizsgálati módszerek. Referenciabetonok vizsgálathoz
MSZ EN 12371:2002	Természetes építőkövek vizsgálati módszerei. A fagyállóság meghatározása
MSZ EN 12620:2006	Kőanyaghalmazok (adalékanyagok) betonhoz (Módosítás: MSZ EN 12620:2002+A1:2008)

MSZ EN 13687-1:2002 Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Vizsgálati módszerek. A hőmérséklet-változással kapcsolatos tűrőképesség (összeférhetőség) meghatározása. 1. rész: Fagyasztási-olvasztási ciklusok olvasztósó oldatba merítéssel

MSZ EN 13687-3:2002 Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Vizsgálati módszerek. A hőmérséklet-változással kapcsolatos tűrőképesség (összeférhetőség) meghatározása. 3. rész: Hőmérséklet-változási ciklusok olvasztósóoldat hatása nélkül

prEN 12390-9:2002 Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling, ill. Prüfung von Festbeton. Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand, Abwitterung

MSZ CEN/TS 12390-9:2007 A megszilárdult beton vizsgálata. 9. rész: Fagyállóság. Lehámlás. Műszaki előírás, amely a prEN 12390-9:2002 szabványtervezetet felváltotta.

MSZ CEN/TR 15177:2009 A beton fagyállóságának vizsgálata. Belső szerkezeti károsodás. Műszaki jelentés

DIN 1045-2:2008 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendunsregeln zu DIN EN 206-1. A DIN EN 206-1 európai szabvány német nemzeti alkalmazási dokumentuma

DIN-Fachbericht 100:2005 Beton. Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung Zusammenstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

Balázs L. Gy. – Kausay T.: Betonok fagy- és olvasztósó-állóságának vizsgálata és követelmények. Vasbetonépítés. 1. rész: értelmezés. X. évf. 2008. 4. szám. pp. 127-135.; 2. rész: Vizsgálat. XI. évf. 2009. 2. szám. pp. 55-65.

Bilgeri, P. – Eickschen, E. – Felsch, K. – Klaus, I. – Vogel, P. – Rendchen, K.: Verwendung von CEM II- und CEM III-Zementen in Fahrbahndeckenbeton. Beton-Informationen. 2007. No. 2. pp. 15-31.

Bollmann, K. – Lyhs, P.: Hüttensandhaltiger Zement für Betonfahrbahndecken – CEM II/B-S 42,5 N (st). Beton-Informationen. 2005. No. 5. pp. 91-100.

Erdélyi A.: Légpórusrendszer és betontartósság. c. fejezet a „Betonszerkezetek tartóssága” c. konferencia kiadványban (szerk.: Balázs Gy. és Balázs L. Gy.), 1996. pp. 129-138. Műegyetemi Kiadó, Budapest

Kausay T.: Betonok környezeti osztályai. Beton. XVII. évf. 2009. 7-8. szám. pp. 3-8.

Lang, E.: Einfluss unterschiedlicher Karbonatphasen auf den Frost-Tausalzwiderstand – Labor- und Praxisverhalten. Beton-Informationen. 2003. No. 3. pp. 39-57.

Setzer, M. J.: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonwaren. Universität GH Essen. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen. 1990. Nr. 49.

Setzer, M. J.: CIF Test – Testmethode zur Bestimmung des Frostwiderstands von Beton (CIF) – RILEM Recommendation TC 117-FDC: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test – Referenze method and alternative methods A and B. Materials and Structures. Vol. 37. 2004. pp. 743-753.

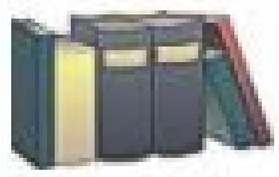
Springenschmid, R.: Betontechnologie für die Praxis. Bauwerk Verlag GmbH., Berlin, 2007.

Zement Taschenbuch: Verein Deutscher Zementwerke e. V. 2002. Düsseldorf

Jelmagyarázat: ❖ A jel előtt álló fogalom a fogalomtár szócikke.

A cikk eredeti változata megjelent a	BETON szakmai havilap	2010. február havi számának 14-18. oldalán (1. rész) és a 2010. április havi számának 14-19. oldalán (2. rész)

Fiatal beton szilárdulási folyamata
1. rész: Nurse-Saul-féle modell, Papadakis-Bresson-féle modell



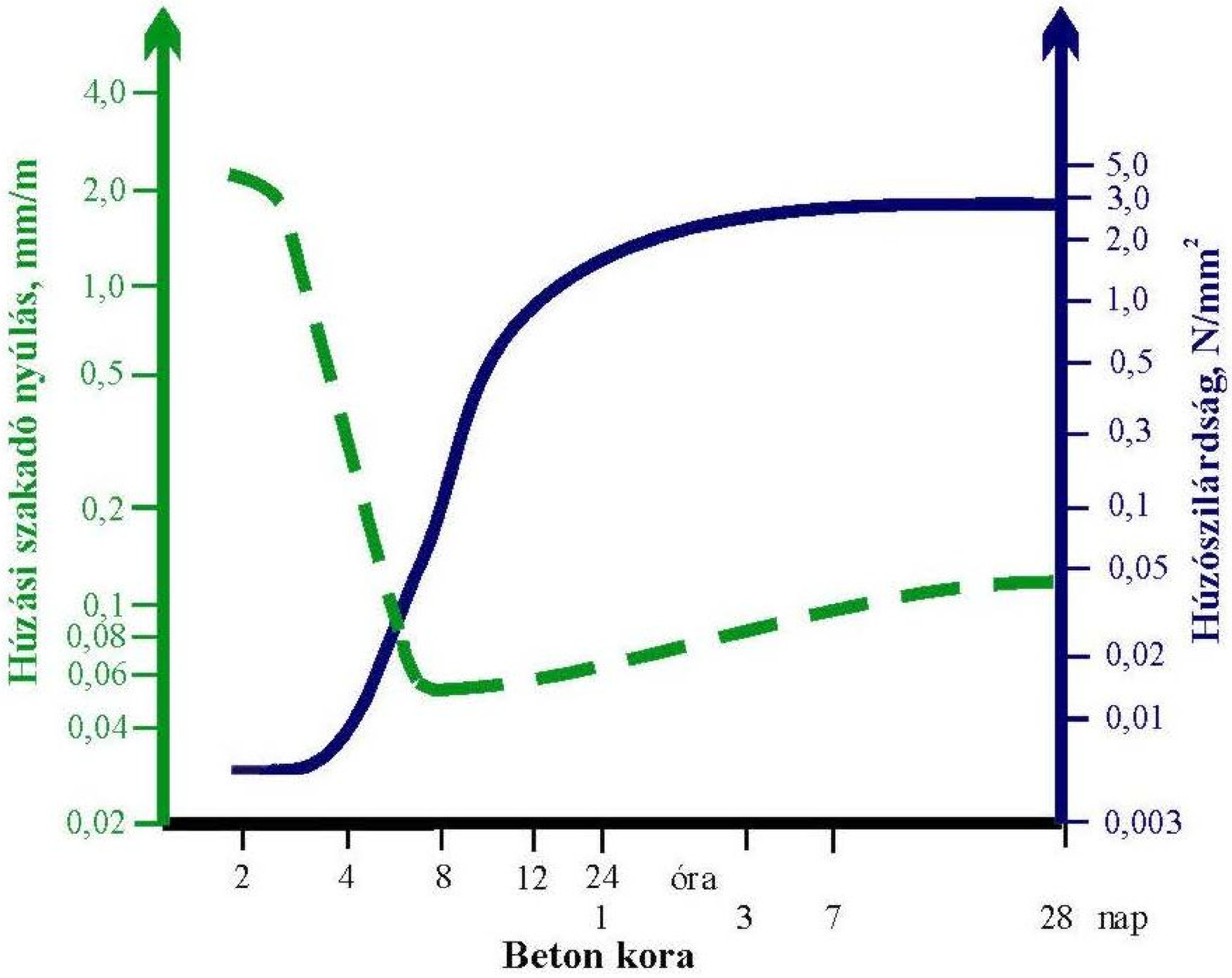
Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. 1. Teil: Modell nach Nurse-Saul, Modell nach Papadakis-Bresson
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 1: Model for Nurse-Saul, Model for Papadakis-Bresson
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 1: Modèle pour Nurse-Saul, Modèle pour Papadakis-Bresson

1. BEVEZETÉS

A beton, illetve az előre gyártott beton elem korai repedés érzékenysége, kizsaluzhatósága, előfeszíthetősége, szállíthatósága stb. a *fiatal beton* szilárdulási (érési) tulajdonságaitól függ.

A fiatal beton szilárdulási folyamatát sok tényező, például a cement fajtája és mennyisége, a víz-cement tényező, a kiegészítő anyag és az adalékszer hatása, a tömörítés és az utókezelés módja és időtartama, a beton hidratációs (belső) hőmérséklete és a környezet (külső) hőmérséklete, a beton kora, voltaképpen a cementkő szilárdulása (hidratációja) és porozitása befolyásolja. Dolgozatunkban e tényezők közül első sorban az idő és a hőmérséklet hatását tárgyaljuk.

A beton kötési-szilárdulási állapota szerint meg szokták különböztetni a friss betont, azon belül a zöld betont és a fiatal betont, valamint a szilárd betont. *Zöld betonnak* a beépített és betömörített, de még kötés előtt lévő friss betont nevezik, amelynek „zöld szilárdsága" (mintegy 0,1-0,3 N/mm^2, legfeljebb 0,5 N/mm^2) nem a hidratáció, hanem a cementpép folyáshatárának és adhéziós erejének köszönhető. A zöld beton a hidratáció, a kötés és szilárdulás előrehaladtával éles határ nélkül, a víz hozzáadásától számított mintegy 6-12 óra között a képlékeny állapotból átmegy a *fiatal beton* viszkoelasztikus állapotába, amelyet nagy ernyedés (relaxáció) jellemez. A még közel képlékeny állapotú fiatal beton saját és gátolt alakváltozásból keletkező feszültségeinek nagy része az első napon még leépül, miközben azok az alakváltozások, amelyek a beton 48 órás kora után lépnek fel, csak nagyon lassan mérséklődő feszültségek forrásai. A fiatal beton megrepedése szempontjából a szakadó nyúlás mértéke a meghatározó. Ez eleinte igen nagy, de a beton dermedése után, a szilárdulás ütemétől függően, általában 6-16 órán belül minimumra esik (értéke mintegy 0,04-0,08 mm/m), majd egy hét alatt duplájára nő. Ahol a húzási szakadó nyúlás görbéjének minimuma, ott a beton – az idő függvényében ábrázolt – húzószilárdsági görbéjének inflexiós pontja van (*1. ábra*). Ettől az időponttól (vagy a *Vicat*-féle kötés kezdetétől) általában 14 napos korig (vagy rövidebb ideig, például 36 vagy 72 órás korig) nevezik a betont fiatal betonnak. A fiatal beton már megkötött és nem munkálható meg, átmenetet képez a friss és a szilárd beton között.

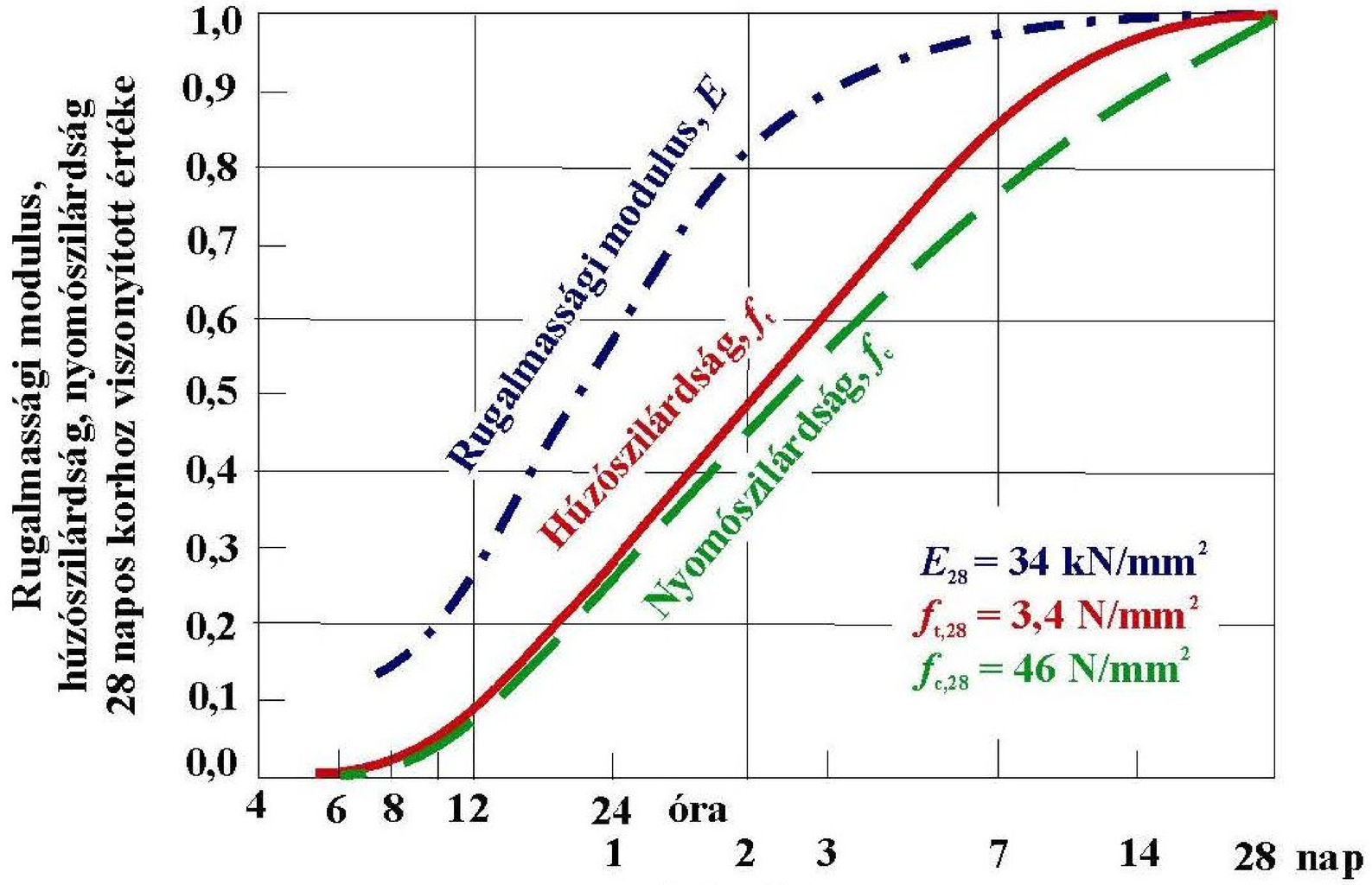


1. ábra: A zöld és a fiatal beton húzási tulajdonságai.

Forrás: vdz Zement-Taschenbuch (2008), *Zilch, K. – Diederichs, C. J. – Katzenbach, R.* (2001), *Schießl, P.* (2003), *Weigler, H. – Karl, S.* (1974)

A beton szilárdulása időben lejátszódó folyamat (*2. ábra*). A *20 °C hőmérsékleten szilárduló fiatal beton rugalmassági modulusa* már 24 órás korban elérheti a 28 napos korú beton rugalmassági modulusának mintegy 70 %-át, 2 napos korban pedig akár a 90 %-át. A rugalmassági modulus növekedésével az ernyedés – azaz az alakváltozási képesség, amelyben az ébredő feszültségek elenyésznek – egyre kisebb lesz. A beton *húzószilárdságának* fejlődése erősebben függ a cement fajtájától, 2 napos korban a 28 napos beton húzószilárdságának 50-65 %-át, 7 napos korban 80-85 %-át teheti ki. A nagyon lassan szilárduló cementek esetén 1-2 napos korban a még nagyon kis húzószilárdság és már nagyon nagy rugalmassági modulus következtében nagyon kicsi a nyúlási képesség, de később eléri a végértéket (0,1 mm/m). A beton *nyomószilárdsága* is jelentős mértékben függ a cement fajtájától. A nyomószilárdság a lassan, illetve a gyorsan szilárduló cementek esetén 3 napos korban a 28 napos beton nyomószilárdságának 35-55 %-át, 7 napos korban 60-75 %-át érheti el, mint az MSZ EN 206-1:2002 szabvány 12. táblázatából is kitűnik. (*Iványi Gy.*, 2006.)

Az időfüggő alakváltozási tulajdonságok, mint a *kúszás és az ernyedés*, jelentős mértékben függenek a fiatal beton korától és az igénybevétel sebességétől, amely utóbbi a fiatal beton esetén lassúnak tekinthető. A fiatal beton ernyedési viszonyainak meghatározásához fontos a gátolt alakváltozásból eredő feszültségek leépülésének megismerése. Az ernyedési tényező, azaz a maradó feszültség és a számított, gátolt alakváltozásból eredő feszültség viszonyszáma, a kísérletek szerint, a terhelés hirtelen megjelenését követő 4-5 nap múlva 0,65-0,70. Ha a friss betont 1 napos korban hirtelen terhelik meg, vagy a terhet 2-4 napos korban lassan, több nap alatt hordják fel, akkor mind a két esetben 0,5 értéknél kisebb az ernyeedési tényező. A szilárdulás előre haladtával a beton ernyedési képessége erősen lecsökken. (*Iványi Gy.*, 2006.)

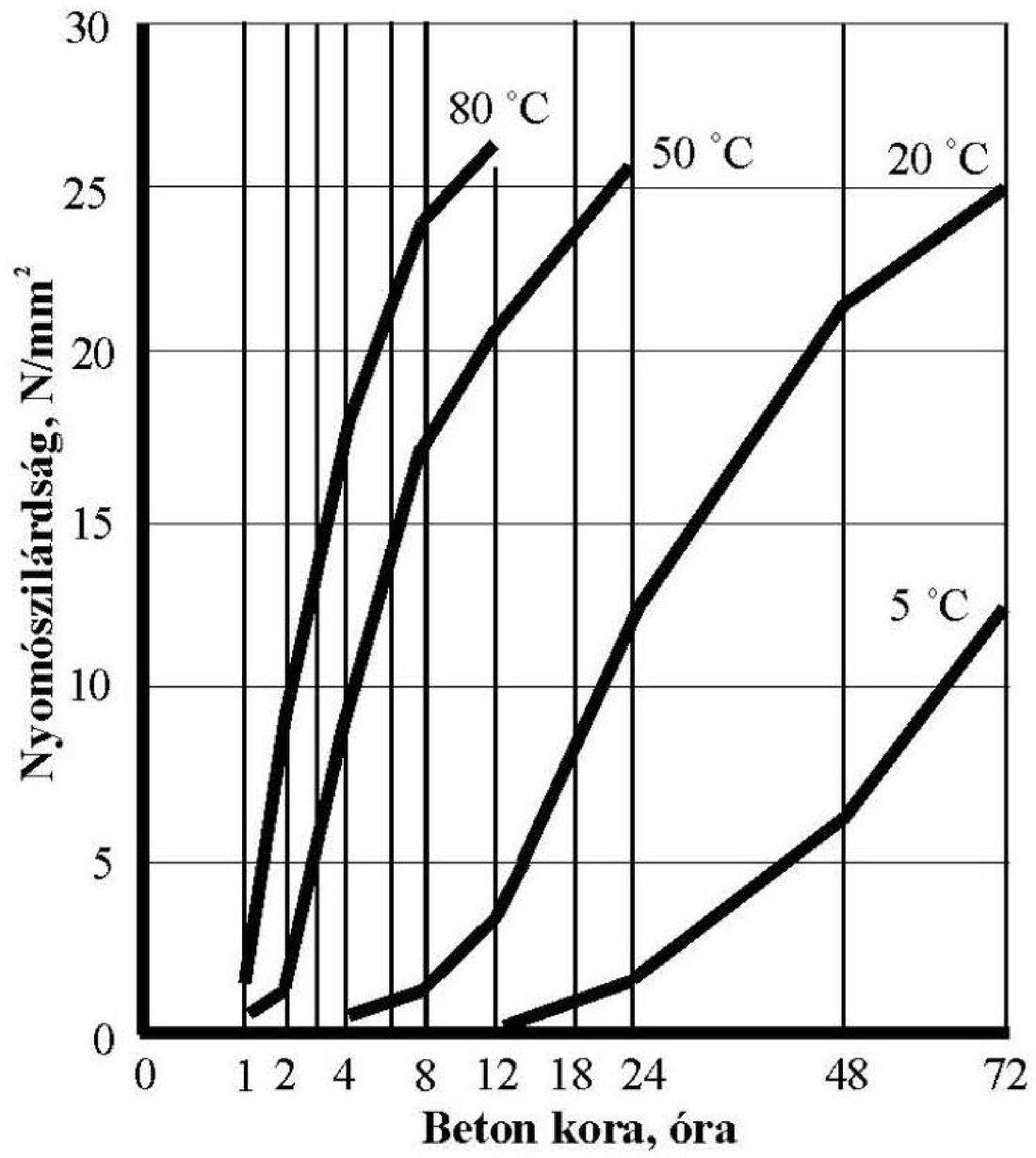


2. ábra: A beton 28 napos korhoz viszonyított rugalmassági modulusának, húzó- és nyomószilárdságának növekedése az idő függvényében.

Forrás: *Weigler, H. – Karl, S.* (1974), *Iványi Gy.*, (2006), *Springenschmid, R.* (2007)

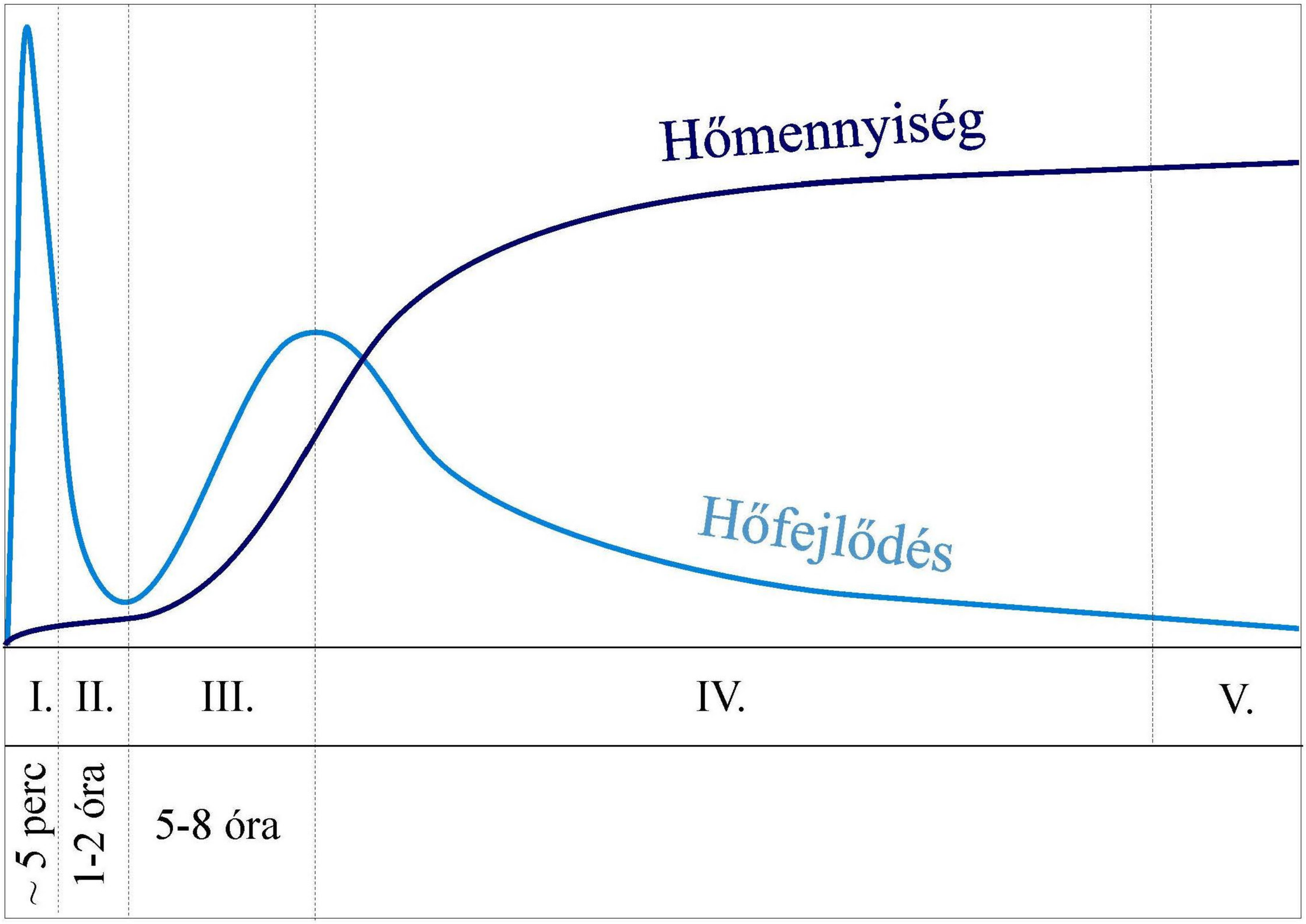
Beton kora

A beton kis hőmérsékleten lassabban, nagy hőmérsékleten gyorsabban szilárdul (*3. ábra*). A szilárdulást befolyásoló hőmérsékletnek két összetevője van, az egyik a beton hidratációs (belső) hőmérséklete (*4. ábra*), a másik a beton hőmérsékletére hatást gyakorló, a rövidhullámú (pl. napsugárzás) és a hosszúhullámú (pl. tárgyakról visszaverődő) hősugárzásból eredő környezeti (külső) hőmérséklet, amely a hidratációs hőfejlődés csillapodása után, lényegében a beton 48 órás korát követően, meghatározóvá válik. A környezeti hőmérsékletnek ezt a szilárdulást és alakváltozást befolyásoló hatását veszik figyelembe az érési, szilárdulási modellek, többnyire úgy, hogy a környezeti hőmérséklet hatását a 20 vagy 25 °C hőmérsékleten érlelt beton szilárdsági tulajdonságaira – mint összevetési alapra – vonatkoztatják. Dolgozatunkban a hőmérséklet alatt a beton környezeti hőmérsékletét értjük.



3. ábra: A hőmérséklet hatása a fiatal beton nyomószilárdságára, 350 kg/m³ CEM I 32,5 jelű cementtartalom és 0,5 víz-cement tényező esetén, *Wierig, H. J.* (1970) után.

Forrás: *Springenschmid, R.* (2007).



4. ábra: Hidratációs hőfejlődés folyamata
I. fázis: Lényegében a szabad kalciumoxid és a trikalcium-aluminát (felit) hidratációjának, valamint az ettringit, illetve a monoszulfát képződésnek a fázisa.
II. fázis: Az ettringit és a monoszulfát összefüggő burokként vonja be az aluminát (felit) és az aluminátferrit (celit) fázisokat, ezzel késleltetve ezek hidratációját, a hőfejlődés átmenetileg csökken. Alvó vagy nyugalmi periódusnak is nevezik.
III. fázis: A fázisokat bevonó burok átkristályosodás, ozmózis nyomás folytán áthatolhatóvá válik, a cement szemek reakcióképessége helyreáll, a hőfejlődés újra fokozódik és eléri maximumát.
IV. fázis: A hőfejlődés csökken és nullához tart. Kishőfejlesztésű cementek esetén ebben a fázisban csekély utómelegedés és harmadik, kis hőfejlődés csúcs lép fel.
V. fázis: A hidratáció gyakorlatilag befejeződik.
Forrás: *Madaleno, A. C. L.* (2002)

A sok befolyásoló tényező ellenére kidolgoztak olyan viszonylag egyszerű számítási módszereket (modelleket), amelyekkel a fiatal beton szilárdsági tulajdonságai (például a korai nyomószilárdság, húzószilárdság, rugalmassági modulus) *az idő és a hőmérséklet függvényében meghatározhatók*, és amelyek a beton szilárdulási folyamatát, érési állapotát leíró vagy becslő módszereknek (németül: Konzept der Betonreife, Konzept gewichteter Reife des Betons, Reifemodell; angolul: maturity method; franciául: méthode d'échéance) nevezhetők (*Zement-Taschenbuch*, 2008). Az irodalomban számos modell található (*Madaleno, A. C. L.*, 2002), dolgozatunkban ezek közül a legalapvetőbbeket tekintjük át.

2. NURSE-SAUL-FÉLE MODELL

A *Saul*-féle modell megfogalmazásának előzménye, hogy *R. W. Nurse* 1949-ben a beton szilárdulásának becslésére a hidratációs hőmérsékletből levezetett lineáris összefüggés alkalmazását javasolta. A *Nurse*-féle elképzelést *A. G. A. Saul* 1951-ben fejlesztette tovább, ezért *Saul* módszerét sokszor *Nurse-Saul*-féle modellnek nevezik.

A *Saul*-féle elmélet szerint a gőzölt beton korai nyomószilárdsága kizárólag az R érési fok-idő függvénye, és azt a hőmérséklet és a cement fajtája nem befolyásolja. A gőzölt beton R érési fok-idő száma nem más, mint a gőzölési idő-hőmérséklet diagram alatti terület nagysága, amelyet *Saul* a következő érési formulával (németül: Reifeformel von *Saul*) fejez ki:

$$R = \Sigma(T_i + 10)\cdot\Delta t_i \quad [^oC\cdot\text{óra vagy } ^oC\cdot\text{nap}] \qquad (1)$$

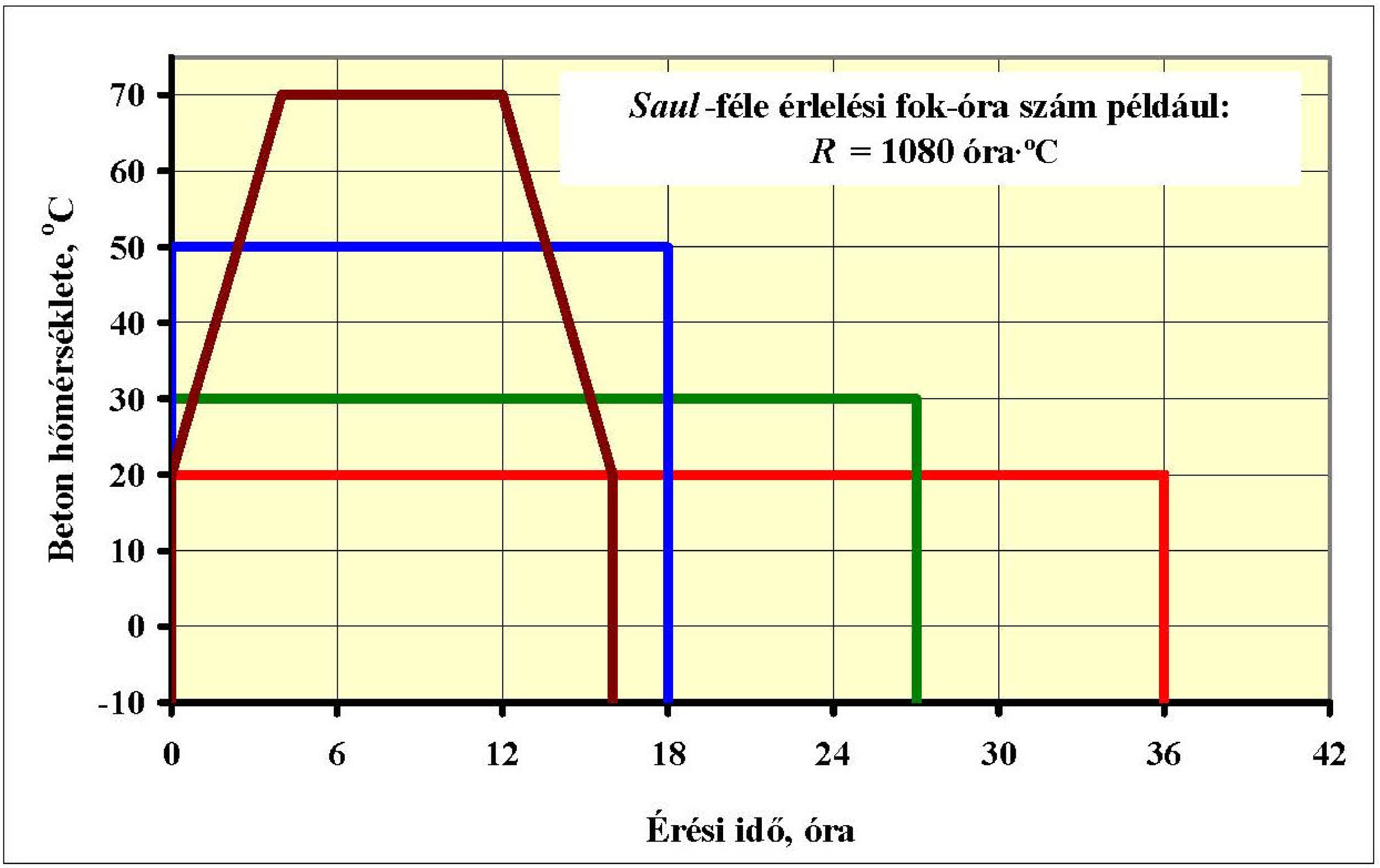
ahol:

- R a beton érését (hidratáció előrehaladtát) kifejező fok-idő (fok-óra vagy fok-nap) szám (németül: Reife), mint a gőzölt beton gőzölési idő-hőmérséklet diagramja alatti terület nagysága
- T_i az adott szilárdulási időtartam (intervallum) alatt változatlan betonhőmérséklet vagy átlag betonhőmérséklet, °C-ban kifejezve
- Δt_i a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan vagy átlagával jellemezhető (T_i), napban vagy órában kifejezve
- i a szilárdulási időtartam (intervallum) sorszáma, $i = 1, 2, 3 \ldots n$

A *Saul*-féle formulából kitűnik, hogy T_i = -10 °C esetén az fok-idő szám R_i = 0,0 °C·óra, tehát *A. G. A. Saul* feltételezi, hogy a beton hidratációja a $T_i = T_0$ = -10 °C alsó hőmérsékleten megáll. Tapasztalatok szerint (+3 és -10) °C hőmérséklet között a beton szilárdulása rendkívül lelassul, és -2 °C hőmérséklet alatt a beton csak akkor szilárdul, ha már olyan szilárd, hogy a fagy nem károsítja (*Springenschmid* 2007).

Saul tételéből az következnék, hogy az azonos összetételű, különböző hőmérsékleten érlelt betonoknak azonos a szilárdsága, ha az R érési fok-idő számuk egyforma. Például a

- 36 órán át konstans 20 °C hőmérsékleten szilárdult beton [$R = (20 + 10)\cdot 36 = 1080$ °C·óra] nyomószilárdsága ugyan akkora, mint az ugyan olyan összetételű, de
- 27 órán át konstans 30 °C hőmérsékleten érlelt betoné [$R = (30 + 10)\cdot 27 = 1080$ °C·óra], vagy a
- 18 órán át konstans 50 °C hőmérsékleten érlelt betoné [$R = (50 + 10)\cdot 18 = 1080$ °C·óra], vagy a
- 4 óra alatt 20 °C-ról 70 °C hőmérsékletre felfűtött, 8 órán át konstans 70 °C hőmérsékleten érlelt és 4 óra alatt 70 °C-ról 20 °C hőmérsékletre lehűtött betoné [$R = (20 + 50/2 + 10)\cdot 4 + (70 + 10)\cdot 8 + (20 + 50/2 + 10)\cdot 4 = 1080$ °C·óra], mert az érési fok-óra számuk egyforma (*5. ábra*).



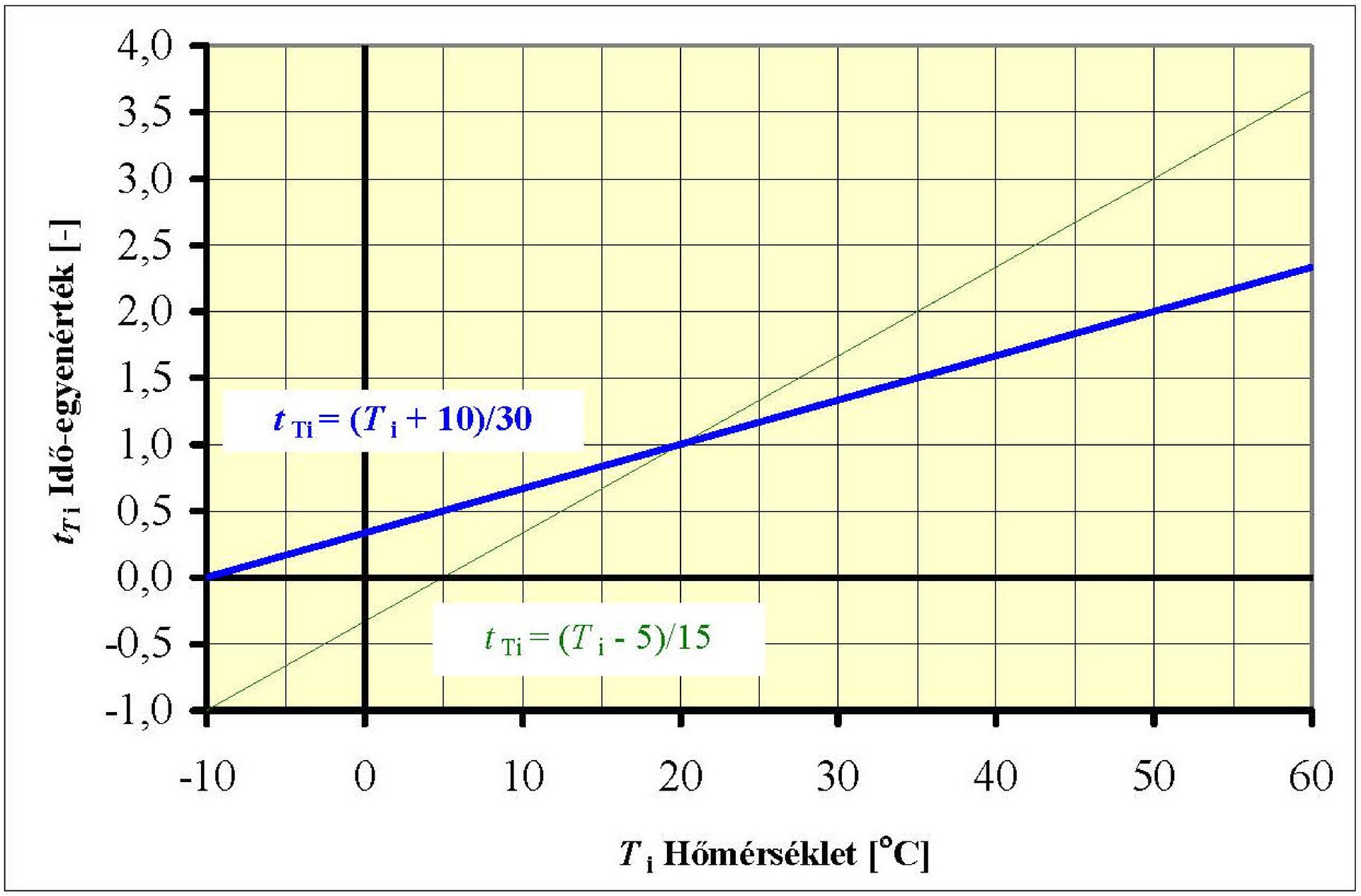
5. ábra: Azonos érési (érlelési) fok-óra számú betonok *Saul*-féle hőmérséklet-idő diagramja

Ha Δt_i = 1 napon át a hőmérséklet $T_{20°C}$ = 20 °C, akkor a 20 °C hőmérséklethez tartozó fok-idő szám $R_{20°C} = (20 + 10)\cdot 1 = 30$ °C·nap. Képezzük egy adott T_i betonhőmérséklethez tartozó R_{Ti} fok-idő szám és a $T_{20°C}$ = 20 °C betonhőmérséklethez tartozó $R_{20°C}$ fok-idő szám hányadosát, ha a szilárdulási időtartam Δt_i = 1 nap:

$$t_{T_i} = \frac{R_{T_i}}{R_{20°C}} = \frac{T_i + 10}{30} \qquad [nevezetlen\ \ szám] \qquad (2)$$

A (2) szerinti hányados azt fejezi ki, hogy egységnyi időtartamot, például 1 napot tekintve, egy adott T_i hőmérséklethez tartozó R_{Ti} fok-nap szám hányszorosa a $T_{20°C}$ = 20 °C hőmérséklethez tartozó $R_{20°C}$ = 30 fok-nap számnak, más szóval, hogy a szóban forgó T_i hőmérsékletű, *i*-edik nap a kémiai reakció (például a beton szilárdulása) szempontjából hány 20 °C hőmérsékletű nappal ér fel. Ezt a t_{Ti} hányadost „érési képlet”-nek (németül: Reifeformel) nevezik, aminél talán kifejezőbb az **idő-egyenérték** megnevezés.

A *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés képe a T_i-t_{Ti} koordináta rendszerben ábrázolva egy $y = a\cdot x + b$ alakú egyenes, amelynek paraméterei: a = 1/30 és b = 10/30. A 20 °C hőmérsékletű nap idő-egyenértéke $t_{Ti} = t_{20°C} = 1{,}0$, a $T_i = T_0 = -10$ °C alsó hőmérsékletű nap idő-egyenértéke $t_{Ti} = t_{-10°C} = 0{,}0$ (*6. ábra*). A következőkben látni fogjuk, hogy a $T_i = T_0 = 5$ °C alsó hőmérséklettel jellemzett *Saul*-féle függvényt a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban akár ma is használhatjuk, ezért a *6. ábrán* ennek egyenesét is feltüntettük.



6. ábra: A *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés, ha $T_i = T_0 = -10$ °C (és ha $T_i = T_0 = +5$ °C)

A *i*-edik tényleges szilárdulási időtartamot (Δt_i) az idő-egyenértékkel (t_{Ti}) megszorozva az ***i*-edik hatékony időtartamot** (németül: *wirksames Betonalter*) kapjuk:

$$\Delta t_{T_i} = t_{T_i} \cdot \Delta t_i = \frac{T_i + 10}{30} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{3}$$

Ha a hatékony időtartamokat a kémiai reakció kezdetétől (például a beton elkészítésétől) a vizsgált időpontig, tehát i = 1-től n-ig összegezzük, akkor megkapjuk, hogy a vizsgált időpontig eltelt tényleges időtartam a kémiai reakció (a beton szilárdulása) szempontjából mekkora t_T **helyettesítő időtartamnak** (németül: *tatsächliches Betonalter*) felel meg, amelyet a *Saul*-féle összefüggés a következőképpen fejez ki:

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_{T_i} = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i + 10}{30} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{4}$$

A (4) összefüggés – 1978. évi CEB-FIP Model Code ajánlásra hivatkozással – megjelent *Szalai K.* (1982) tanulmányának 2.9. fejezetében a fentihez képest azzal a különbséggel, hogy a hatékony időtartamok összegét ($\Sigma\Delta t_{Ti}$) gyorsan szilárduló, ún. rapid cementek esetén kettővel, gyorsan szilárduló nagyszilárdságú cementek esetén hárommal szorozták. Az így kapott t helyettesítő időtartamot a beton képzett korának nevezték, amelyhez tartozó R_t nyomószilárdságból a 28 napos korú beton R_{28} nyomószilárdságát az

$$R_{28} = \frac{R_t}{\gamma_t} = \frac{R_t}{0{,}83 \cdot \sqrt{lg\, t}} \tag{5}$$

összefüggésből számították ki. A t = 1, 7 és 14 napos korú mesterségesen szilárdított beton esetén az (5) alatti összefüggésbe a $\gamma_t = 0{,}83 \cdot \sqrt{\lg t}$ kifejezés helyett $\gamma_1 = 0{,}45$; $\gamma_7 = 0{,}80$; $\gamma_{14} = 0{,}90$ tapasztalati értéket helyettesítettek.

Az *egykori DIN 4227-1:1988 szabványban* (ma helyette a DIN 1045-1:2008 szabvány van érvényben) a *kúszási tényező* (8.3. fejezet) és a *zsugorodás* (8.4. fejezet) $t < \infty$ időponthoz tartozó értékét a *Saul*-féle összefüggésből származtatott helyettesítő időtartam (t_T) figyelembevételével számították ki. A DIN 4227-1:1988 szabvány 8.6. fejezetében a fentiektől eltérően a helyettesítő időtartam (t_T) összefüggését nevezték „wirksames Betonalter"-nek (*Beton-Kalender* 1991, Teil II, pp. 263.).

A *Bunke, N.* szerkesztésében megjelent *DAfStb Heft 422.* kiadvány (1991) 4.2.2 fejezetében a t_T helyettesítő időtartamot a vizsgálati idő ($\Sigma\Delta t_i$) százalékban fejezték ki (németül relative Reife, jele *rel R*):

$$\text{rel } t_T{}^{\%} = \frac{\sum (T_i + 10) \cdot \Delta t_i}{30 \cdot \sum \Delta t_i} \cdot 100 \quad [\textit{nevezetlen szám}] \tag{6}$$

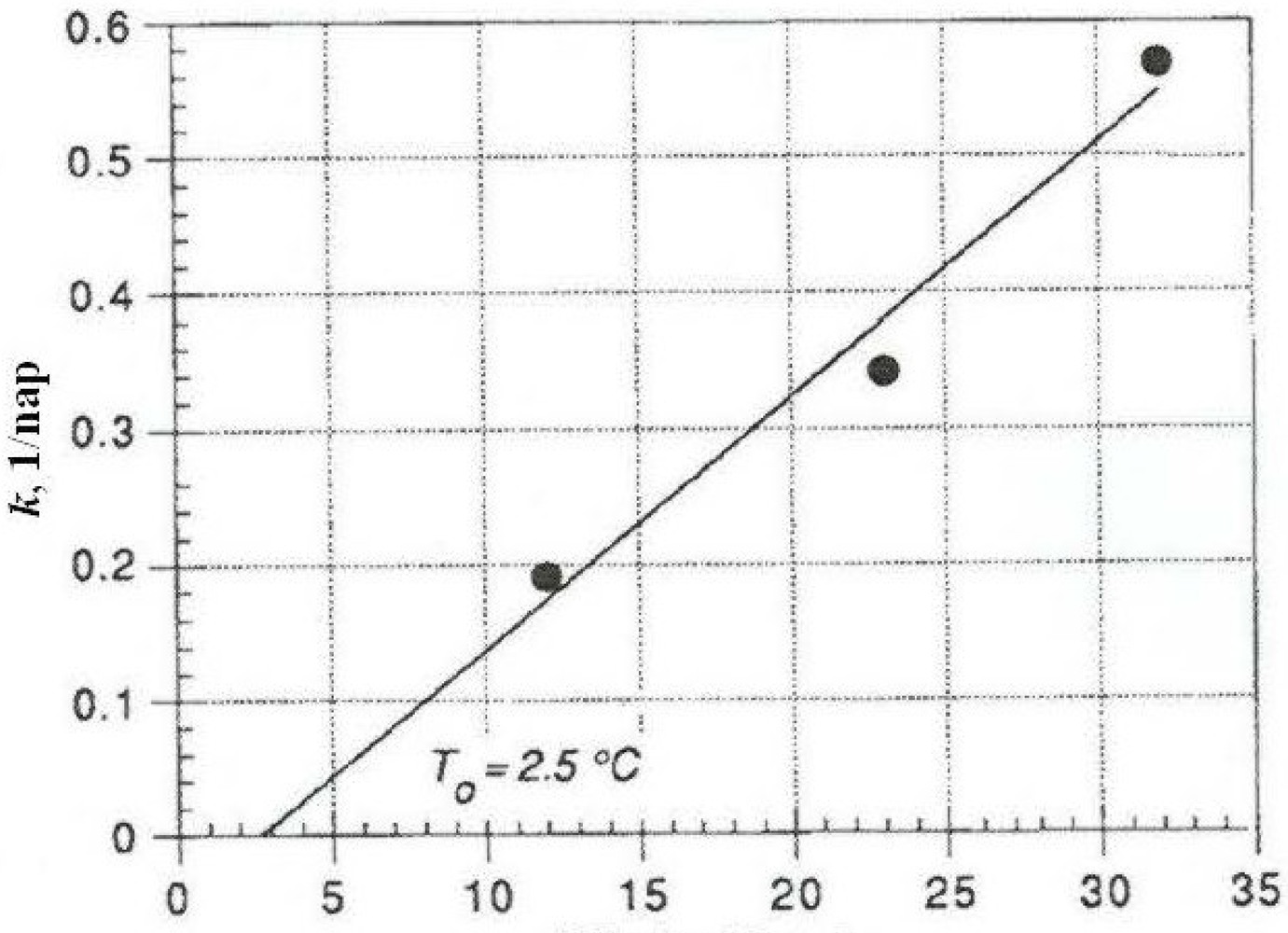
ahol:

T_i a beton napi átlaghőmérséklete, °C-ban kifejezve
Δt_i a napok száma, amelyeken a beton napi átlaghőmérséklete T_i

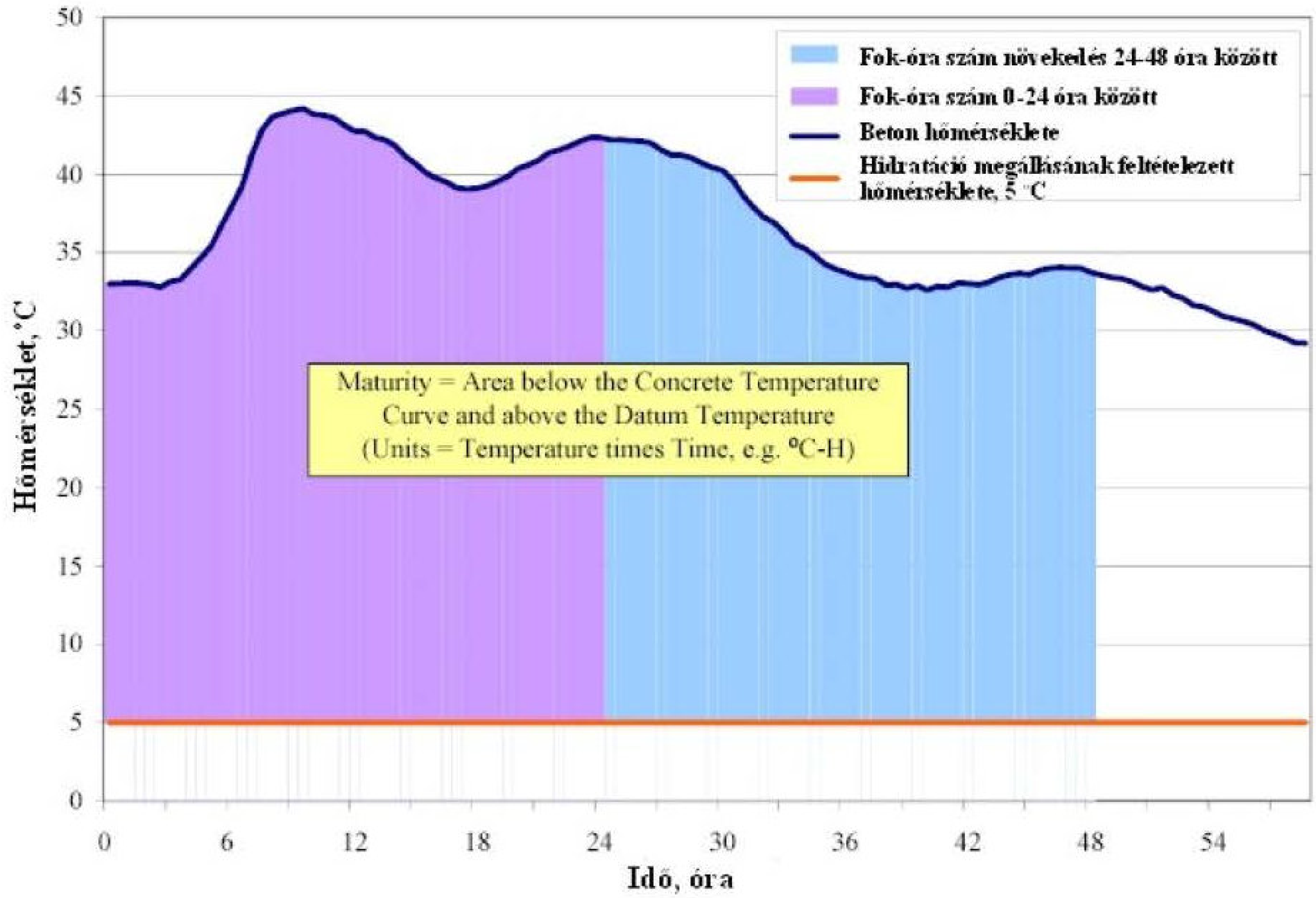
A *Nurse-Saul*-féle elmélet hiányosságai ellenére sem veszítette el időszerűségét, így például az *Iványi György* által szerkesztett *DAfStb Heft 555.* előírás magyarázat (*Iványi Gy.*, 2006) a vízzáró beton építmények irányelvével kapcsolatban a gátolt alakváltozás (németül: Zwang) szempontjából tárgyalja.

Az *ASTM (American Society for Testing and Materials)* Amerikai Anyagvizsgáló Társaság 1987-ben adta ki először az ASTM C 1074-87 szabványt, amellyel a beton érési, szilárdulási állapotának becslését ipari körülmények között is szabályozott módon lehetővé tette (*Report IPRF*, 2006). Az ASTM C 1074-87 szabványban és a ma érvényes változatában (ASTM C 1074-04) két módszert írnak le, ezek egyike a *Nurse-Saul*-féle módszer néven tárgyalt *Saul*-féle, másika a később ismertetésre kerülő *Arrhenius*-féle módszer.

Az ASTM C 1074-04 szabványban és az újabb amerikai irodalomban az eredeti *Saul*- és a később bemutatandó *de Vree*-féle felfogástól (T_0 = -10 °C) eltérő T_0 hőmérsékleteket jelölnek meg a *Saul*-féle fok-óra szám diagram alatti terület alsó határvonalaként (angolul: *datum temperature*), feltételezve, hogy ezen a hőmérsékleten már nincs hidratáció. Ennek megfelelően az ASTM C 1074-04 szabvány 6.2 fejezete a *Nurse-Saul*-féle összefüggést a T_0 értékének megadása nélkül, az (l) szerintitől kissé eltérő $R = \Sigma(T_i + T_0)\cdot\Delta t_i$ alakban mutatja be. A T_0 hőmérséklet jelentőségét a szabvány A1.2 melléklete (Annex A1.2) és X1.2 függeléke (Appendix X1.2) tárgyalja. Az ASTM C 1074-04 szabvány az A1.2 mellékletben a T_0 = 2,5 °C alsó hőmérsékletre közöl diagramot (*7. ábra*), amerikai irodalmi példaként pedig a T_0 = 5 °C alsó hőmérséklet alkalmazására mutatjuk be a *8. ábrát* (*Report IPRF*, 2006).

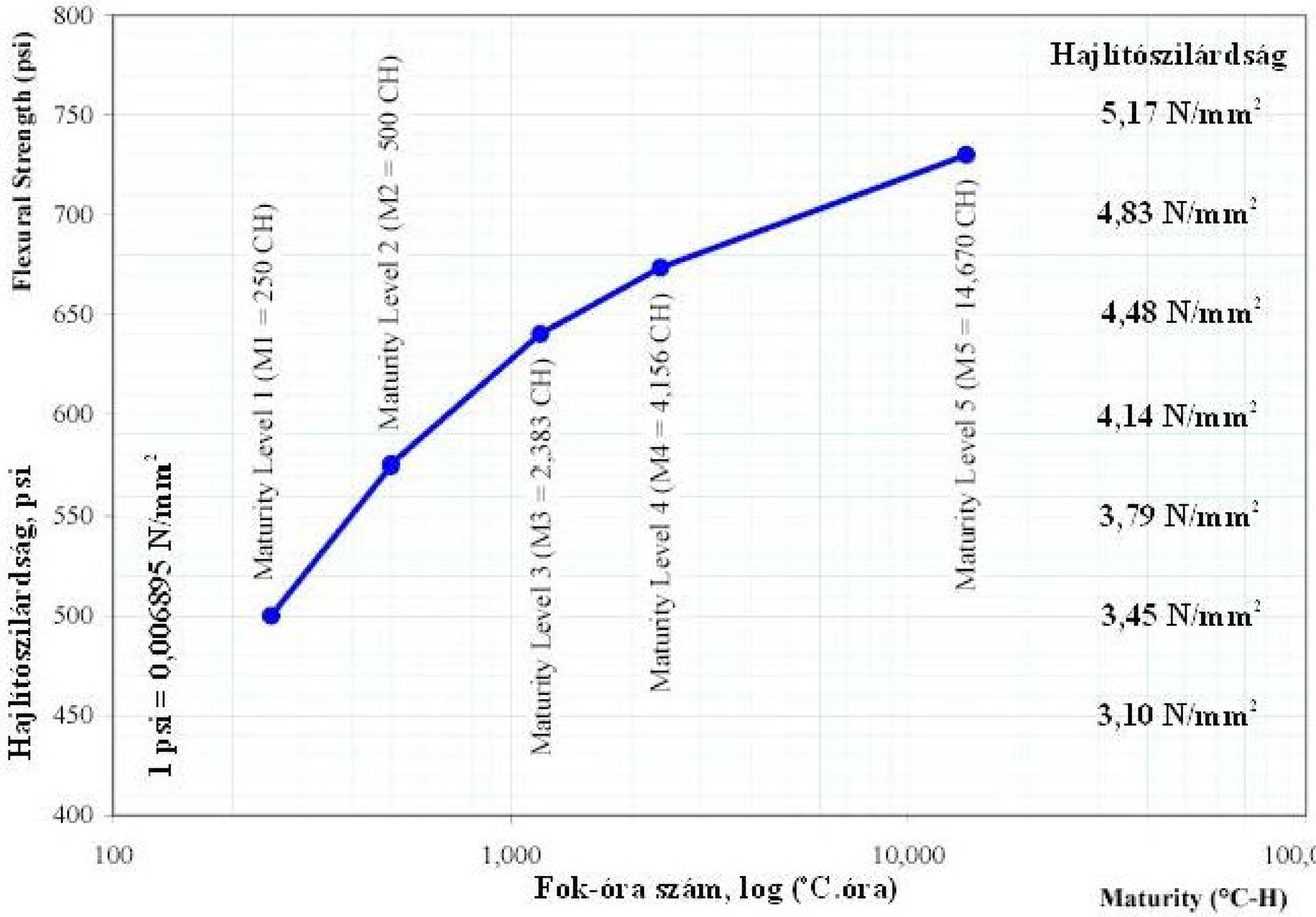


7. ábra: A *Saul*-féle fok-óra szám diagram alatti terület értelmezése az ASTM C 1074-04 szabvány szerint, annak feltételezésével, hogy T_0 = 2,5 °C hőmérséklet alatt nincs hidratáció.



8. ábra: Irodalmi példa a *Saul*-féle fok-óra szám diagram alatti terület értelmezésére, annak feltételezésével, hogy T_0 = 5 °C hőmérséklet alatt nincs hidratáció. Forrás: *Report IPRF*, 2006.

Az *ASTM C 1074-04* szabvány az eredetihez (ASTM C 1074-87) képest bizonyos változtatásokkal van érvényben, például a szilárdulási folyamat vizsgálatát a nyomószilárdságon kívül 2004-ben, az új 8.7 szakasszal a hajlító-húzószilárdságra is kiterjesztették (*9. ábra*).



9. ábra: Összefüggés a *Saul*-féle fok-óra szám és a hajlítószilárdság között. Forrás: *Report IPRF*, 2006

3. PAPADAKIS-BRESSON-FÉLE MODELL

A *Saul*-féle tétel a beton szilárdulási hőmérséklete és nyomószilárdsága közötti összefüggést nagyon leegyszerűsíti. Nem veszi figyelembe, hogy a beton érését kifejező fok-idő szám nagyobb hőmérsékleten hatványozottan növekszik, vagy, hogy a különböző cementféleségeknek különböző hatása van az érési fok-idő számra, pedig például a tiszta portlandcement (CEM I) nyomószilárdságának növekedése nagyobb hőmérsékleten lassabb, mint a kohósalak és egyéb tartalmú portlandcementé (CEM II) vagy a kohósalakcementé (CEM III), és kisebb hőmérsékleten épp fordítva, gyorsabb. Holland cementgyári kísérletek - amelyeket különböző fajtájú és szilárdsági osztályú cementekkel végeztek – eredménye szerint (*Vree – Tegelaar*, 1998) azonos érési fok-óra szám esetén a beton nyomószilárdsága nem azonos, hanem a hőmérséklet növekedésével növekszik (*17. ábra*).

A francia *CERIS* kutatóintézetben (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, Betonipari Tanulmányok és Kutatások Központja, Franciaország, Épernon) *Papadakis, M.* és *Bresson, J.* 1973-ban alakította ki betonérés (szilárdság) becslési módszerét, amellyel – a cement hőérzékenységét figyelembe vevő tényező bevezetése által – a *Saul*-féle eljárást továbbfejlesztette. A bevezetett *Papadakis – Bresson*-féle tényező módosító hatása a nagyobb hőmérsékletek esetén nagyobb, ezért a módszert „súlyozott érés"-nek (hollandul: gewogen rijpheid, angolul: weighted maturity; németül: gewichtete Reife; franciául: maturité pondéré, és a jele *cal R*) nevezték, amelynél magyarul talán kifejezőbb a „cementfüggő" érés megnevezés.

A *10. ábrán* látni, hogy *Papadakis* és *Bresson* az érési idő – diagram alatti területet az abszcissza-tengellyel párhuzamosan 20 °C hőmérséklettől felfele 10 °C hőmérséklet terjedelmű részekre osztotta, és a kapott s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6 nagyságú területeket $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ sorszámmal látta el. Bevezették az „A" tényezőt, amely a cement tulajdonságaitól függő állandó szám, amelynek az n sorszám a hatvány kitevője. Minden n-edik s_{n+1} nagyságú területet az „A^n" tényezővel megszorozták. A 20 °C hőmérséklet alatti s_1 terület szorzója

$A^0 = 1{,}0$; a (20 – 30) °C közötti s_2 területé $A^1 = A$; és így tovább. Az $s_{n+1} \cdot A^n$ szorzatokat összeadva kapták a „súlyozott” (cementfüggő) érési fok-óra számot:

$$F_{mp} = \sum_{n=0}^{i} s_{n+1} \cdot A^n \quad \left[{}^{o}C \cdot óra \right] \tag{7}$$

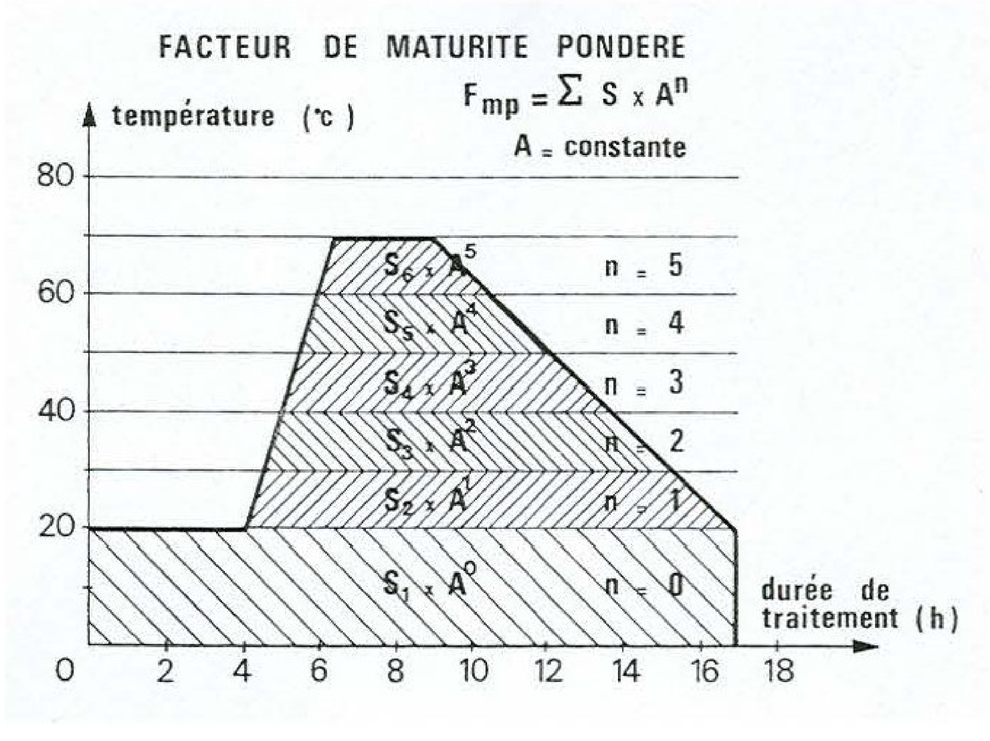
A (7) szerinti *Papadakis-Bresson*-féle összefüggés a *DAfStb Heft 422.* kiadvány (*Bunke, N.*, 1991) 4.2.2 fejezetében is megtalálható.

Papadakis és *Bresson* a relatív nyomószilárdságot (R/R_{28}) a fok-idő számhoz tartozó nyomószilárdságnak (R) és a 20 °C hőmérsékleten tárolt 28 napos próbatestek nyomószilárdságának (R_{28}) hányadosaként fejezte ki a cementfüggő érési fok-idő szám függvényében (*11. - 15. ábra*).

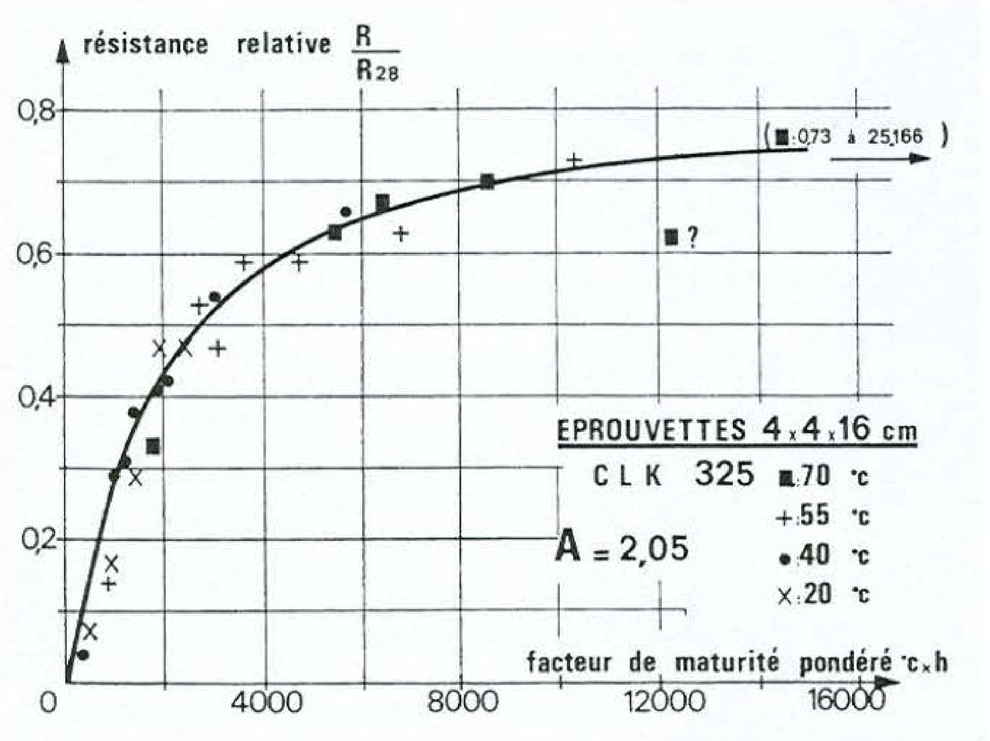
A *11. és 12. ábrán* összesen hat különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatest *Papadakis – Bresson*-féle érési diagramját tüntettük fel, a lineáris beosztású abszcisszán az érési fok-óra szám, az ordinátán a viszonyított nyomószilárdság szerepel. Ezek közül a cementek közül kiválasztottak két cementet, egy mai CEM III kohósalakcementnek megfelelőt (CLK 325 a *13. ábrán*) és egy mai CEM II –V pernyeportlandcementnek megfelelőt (CPAC 325 a *14. ábrán*), és ezek érési diagramját lineáris beosztású, de már a cementfüggő érési fok-óra szám abszcisszájú koordináta-rendszerben (*13. - 14.* ábra), majd közös ábrán, logaritmikus beosztású, cementfüggő érési fok-óra szám abszcisszájú koordináta-rendszerben ábrázolták (*15. ábra*). A szemi-logaritmikus koordináta-rendszerben a *13.* és a *14. ábrán* a görbe futású érési függvények alakja egyenes lett. A cementfüggő „*A*” tényező értéke a *13.* és a *14. ábrán* látható.

A *13. - 15. ábrák* szerint a vizsgált kohósalakcement és pernyeportlandcement 28 napos nyomószilárdságának felét ($R/R_{28} = 0{,}5$) 3000 ^{o}C·óra érési fok-óra szám mellett el lehet érni. A *Papadakis – Bresson*-féle 3000 ^{o}C·óra érési fok-óra számú cementek *16. ábrán* feltüntetett érési diagram változatai közül a technológiailag legkedvezőbbet lehet alkalmazni.

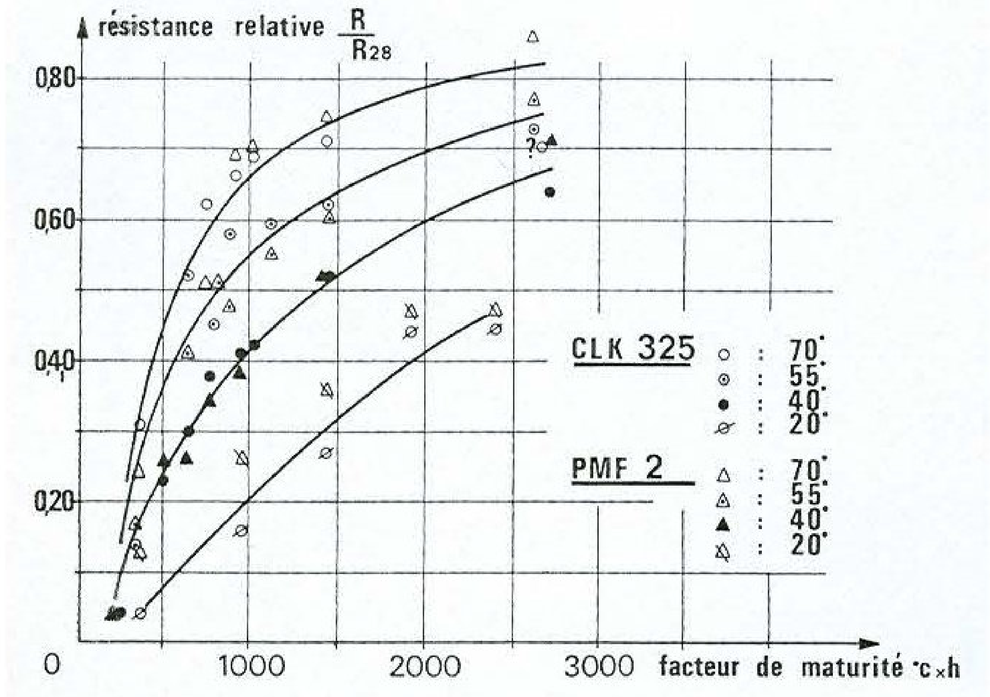
A *Papadakis – Bresson*-féle módszer hátránya, hogy csak 20 °C hőmérséklet felett használható, 20 °C hőmérséklet alatt minden cement egyforma hőérzékenységűnek tűnik, ami nem felel meg a valóságnak, hiszen például kis hőmérsékleten a CEM III/B típusú kohósalakcement szilárdulása lassabb, mint a CEM I tiszta portlandcementé.



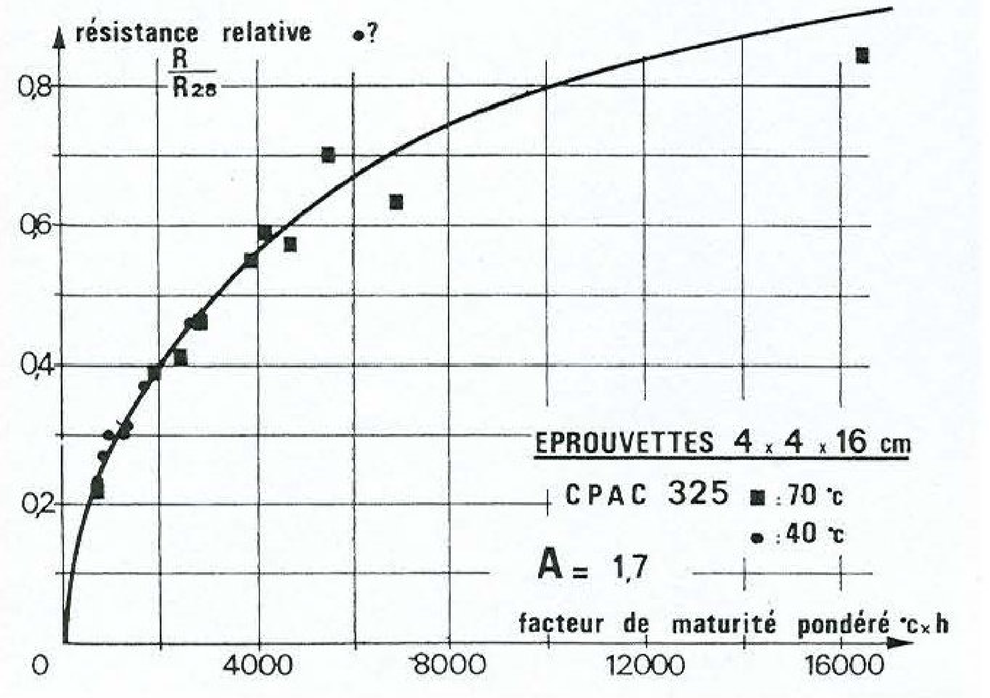
10. ábra: A „súlyozott” (cementfüggő) érési fok-óra szám meghatározása *Papadakis – Bresson* szerint



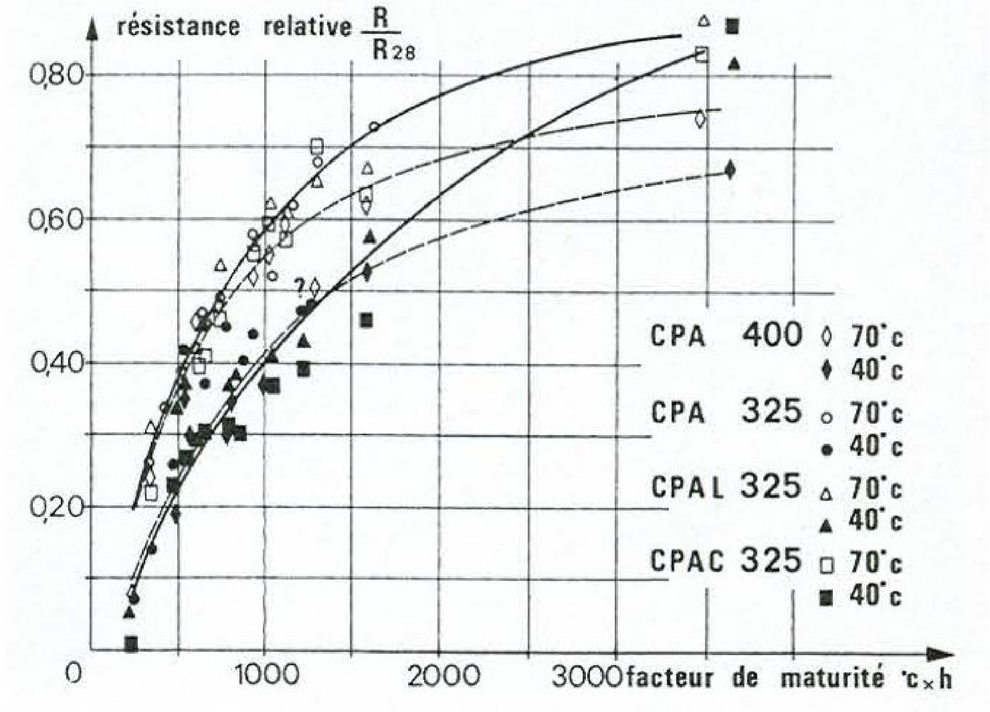
13. ábra: Kohósalakcement próbatestek *Papadakis – Bresson*-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja



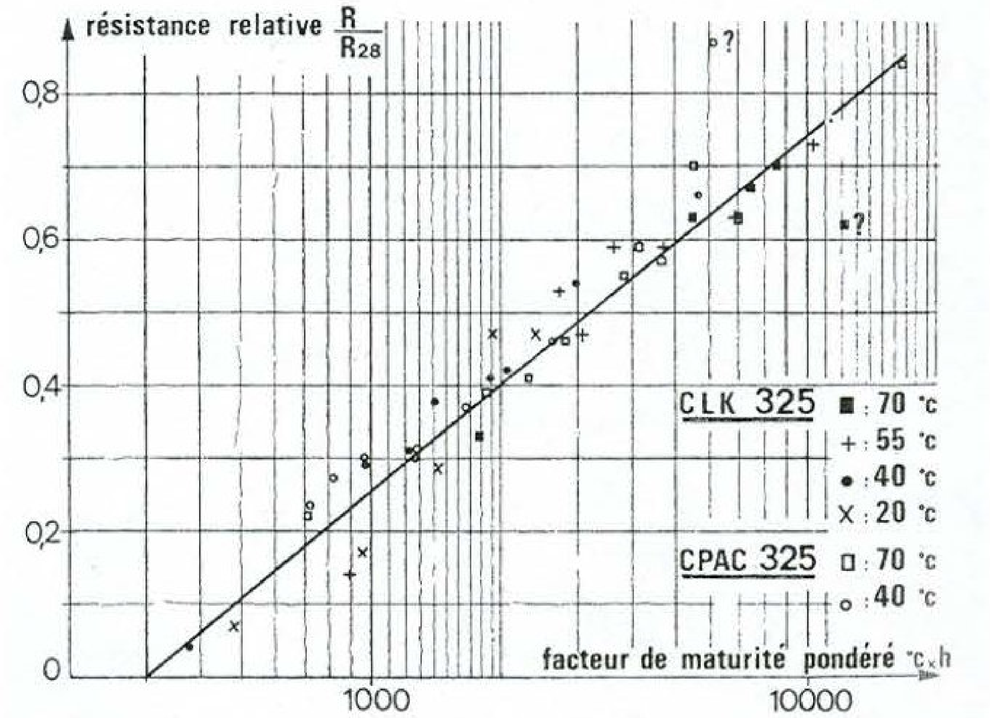
11. ábra: Két különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatest *Papadakis – Bresson*-féle érési diagramja



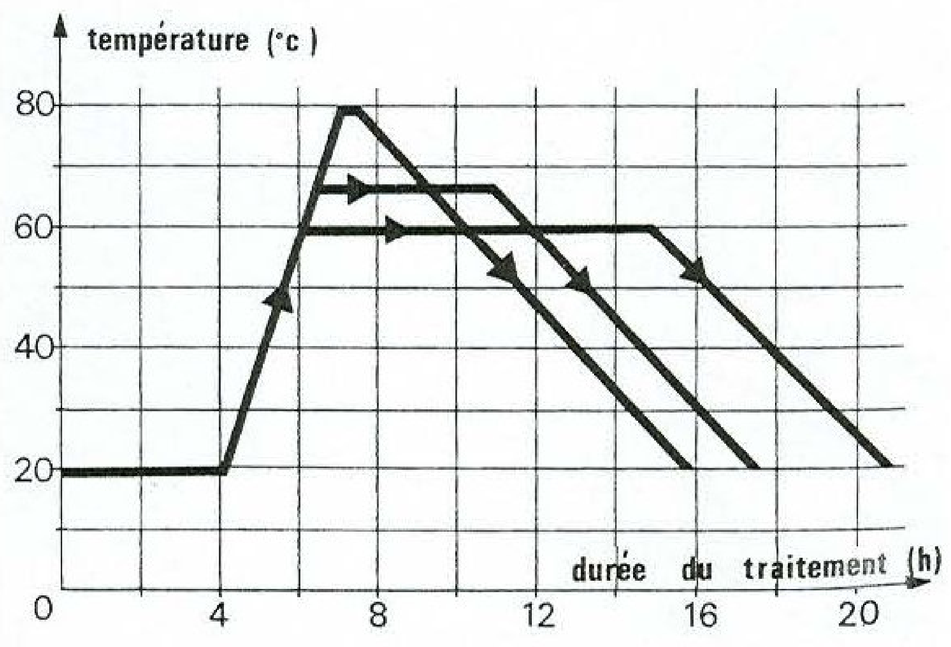
14. ábra: Pernyeportlandcement próbatestek *Papadakis – Bresson*-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja



12. ábra: Négy különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatest *Papadakis – Bresson*-féle érési diagramja



15. ábra: Kohósalakcement és pernyeportlandcement próbatestek *Papadakis – Bresson*-féle „súlyozott” (cementfüggő) érési diagramja szemi-logaritmikus koordináta-rendszerben ábrázolva



16. ábra: *Papadakis – Bresson*-féle 3000 °C·óra fok-óra számú betonok érési diagram változatai

A *10. - 16. ábra* forrása: *Papadakis, M. – Bresson, J.* 1973.

Magyarázat a *10. - 16. ábrához*:

Facteur de maturité = érési fok-óra szám
Facteur de maturité pondéré = „súlyozott" érési fok-óra szám; cementfüggő érési fok-óra szám
Durée de traitement = érési időtartam
Résistance relative = viszonyított nyomószilárdság
Température = hőmérséklet
Eprouvettes = Vizsgálati próbatest mérete
CPA (Ciment Portland Artificiel) = tiszta portlandcement, mai megfelelője: CEM I
CPAL (Ciment Portland Artificiel au Laitier) = kohósalakportlandcement, mai megfelelője: CEM II -S
CPAC (Ciment Portland Artificiel aux Cendres) = pernyeportlandcement, mai megfelelője: CEM II -V
CLK = (Ciment de Laitier de Haut-Fourneaux au Clinker) = kohósalakcement, mai megfelelője: CEM III
PMF-2 (Ciment Pouzzolano-Métallurgique) = kompzitcement, mai megfelelője: CEM V
A cement betűjele után álló szám a cement nyomószilárdsága 28 napos korban, bar-ban kifejezve (1 bar = 0,1 N/mm^2)
A *10. – 14. ábra*, valamint a *16. ábra* abszcissza-tengelye lineáris, a *15. ábra* abszcissza-tengelye logaritmikus beosztású

FELHASZNÁLT IRODALOM

ASTM C 1074-04 „Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", 2004; A szabvány korábbi változata 1993-ban, illetve 1998-ban jelent meg „Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method" címmel

Beton-Kalender 1991: Schriftleitung J. Eibl, Karlsruhe, Teil II, pp. 263, Jahrgang 80., Ernst & Sohn, Berlin, 1991.

Bunke, N. (szerkesztette): „Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweis als Ergänzung zu DIN 1048", DAfStb, Heft 422, Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln, 1991

DIN 4227:1988 „Spannbeton – Teil 1: Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung"

Papadakis, M. – Bresson, J.: „Contribution à l'ètude du facteur de maturité des liants hydrauliques application à l'industrie du béton manufacturé", Revue des Matériaux, Ciments – Betons, Nr. 678, 3/1973, pp. 18-22.

Report IPRF-01-G-002-03-6 „Using Maturity Testing for Airfield Concrete Pavement Construction and Repair", An Research Report IPRF – Innovative Pavement Research Foundation – Airport Concrete Pavement Technology Program. Skokie (USA, Illinois) 2006.

Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure”, Magazine of Concrete Research, 1951, No. 6., pp. 127-140.

Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons”, beton, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

„Zement-Taschenbuch” vdz. Verein Deutscher Zementwerke e.V. 51. Ausgabe. Verlag Bau+Technik GmbH., Düsseldorf, 2008., 5.4.1. fejezet, pp. 329-332.

A dolgozat folytatása ide kattintva olvasható.

A cikk rövidített változata megjelent a BETON szakmai havilap 2010. december havi számának 6-8. oldalán

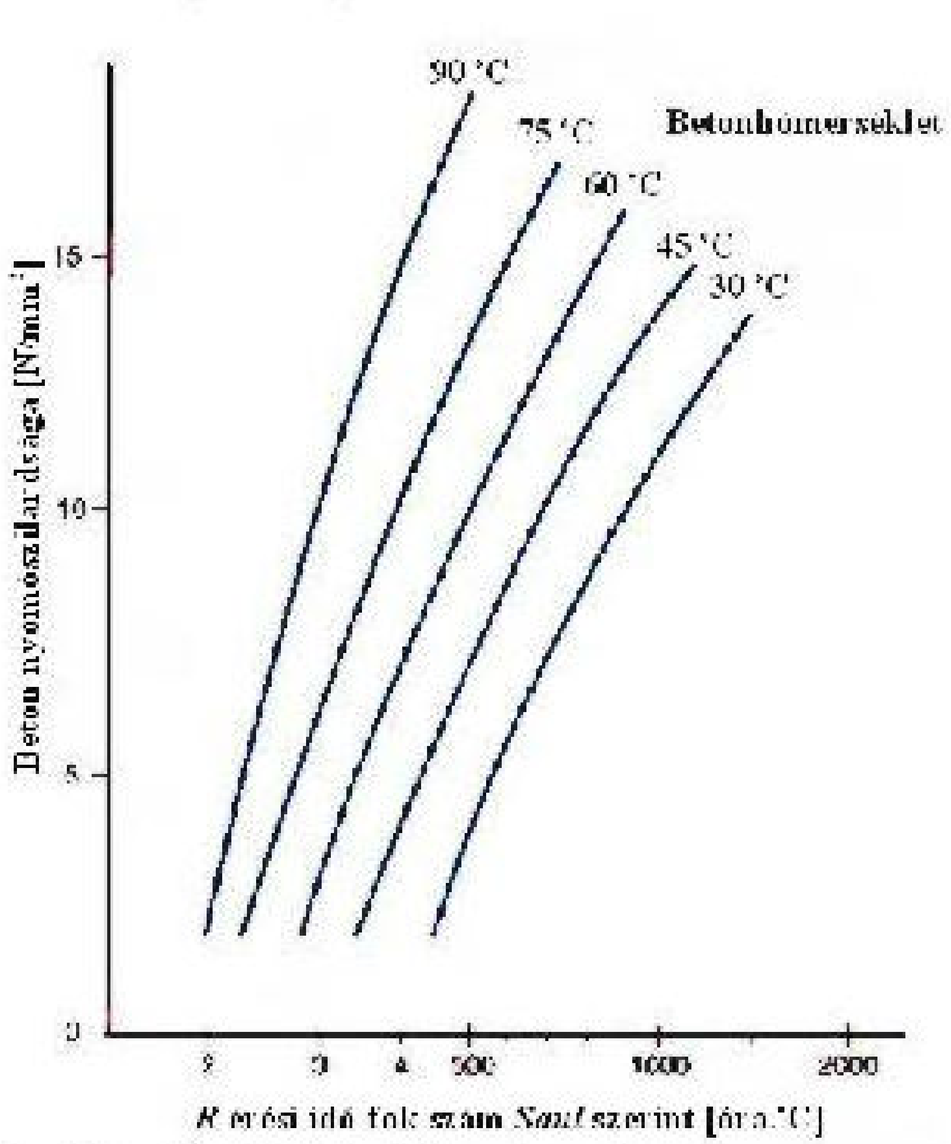
	Fiatal beton szilárdulási folyamata **2. rész: De Vree-féle modell**	
Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. Teil 2.: Modell nach de Vree	
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 2: Model for de Vree	
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 2: Modèle pour de Vree	

Fogalom-tár

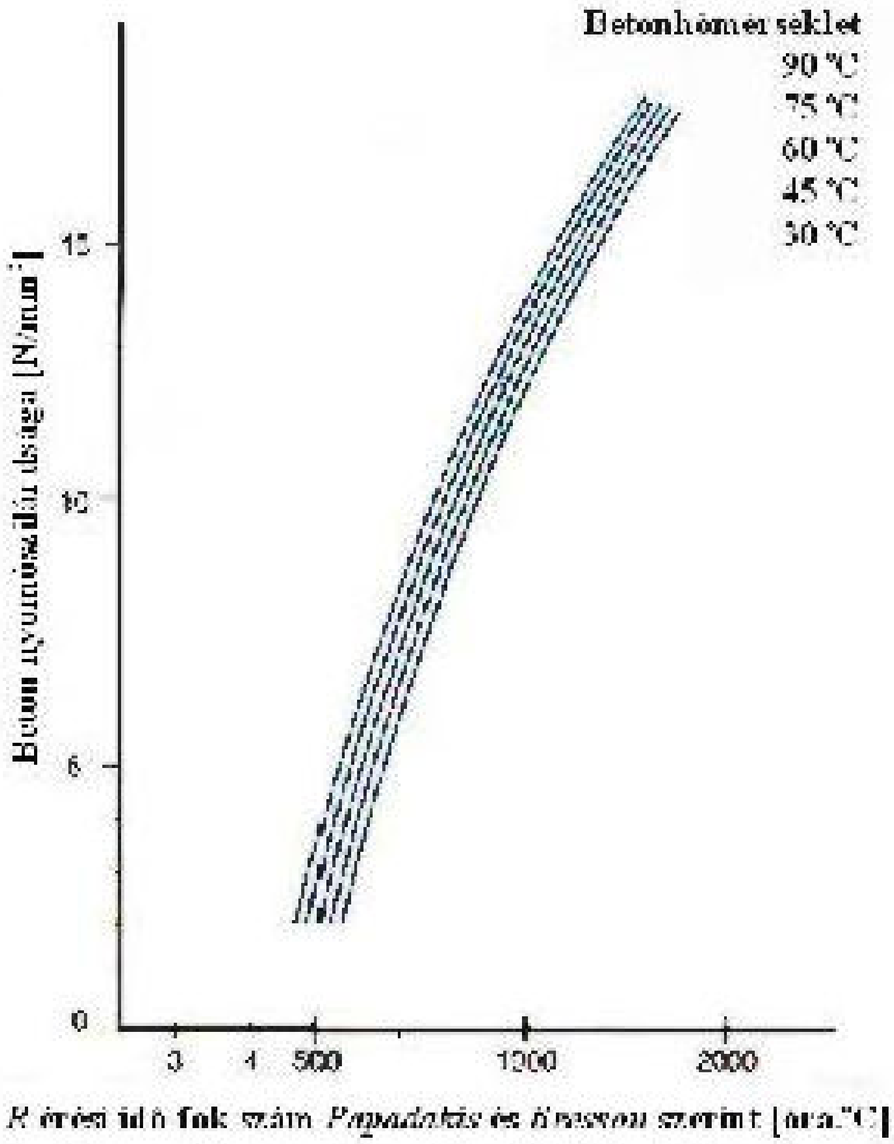
Dr. Kausay Tibor
http://www.betonopus.hu

A holland *R. de Vree* (1998) úgy alakította át a *Papadakis – Bresson*-féle módszert (1973) (◄), hogy az 20 °C hőmérséklet alatt is használható legyen. Noha a *de Vree*-féle és a *Papadakis – Bresson*-féle módszer nagyon hasonló, a kettő nem cserélhető fel, mert az érési fok-idő szám értékére a két módszer szerint számolva más eredmény adódik.

De Vree és *Tegelaar* (1998) holland kísérleti eredményeket – a *Saul*-féle módszer (1951) (◄) kritikájaként – dolgozott fel a *Saul*-féle módszerrel (*1. ábra*), majd azokat átszámolta és ábrázolta a *Papadakis – Bresson*-féle módszer szerint is (*2. ábra*), és az utóbbi esetben a cementfüggő érési fok-idő szám függvényében valamennyi érési hőfok esetén közel azonos szilárdságokat kapott.



1. ábra: Érési fok-idő szám – beton nyomószilárdság összefüggés. Holland kísérleti eredmények a *Saul*-féle módszerrel feldolgozva. A *Saul*-tétel kritikája



2. ábra: Cementfüggő érési fok-idő szám – beton nyomószilárdság összefüggés. Holland kísérleti eredmények a *Papadakis – Bresson*-féle módszerrel feldolgozva

Megjegyzés: Az *1.* és a *2. ábrán* az abszcissza-tengely logaritmikus beosztású.
Forrás: *De Vree – Tegelaar*, 1998.

A *Papadakis – Bresson*-féle modell korlátainak feloldására *de Vree* bevezetett egy új cement hőérzékenységet kifejező C tényezőt (németül: Wichtungsfaktor für die Zementart) és a „javított cementfüggő” (korrigált) érési fok-óra szám (németül: gewichtete Reife) fogalmát:

$$R_{\text{de Vree}} = \Sigma r_i \cdot \Delta t_i \qquad [°C \cdot \text{óra}]$$

ahol:

$R_{\text{de Vree}}$	a beton érését (a hidratáció előrehaladtát) kifejező „javított cementfüggő” fok-óra szám *de Vree* szerint
r_i	az adott szilárdulási időtartam (óra) alatt változatlan „javított cementfüggő” betonhőmérséklet, °C-ban kifejezve, amely a cement hőérzékenységét kifejező *de Vree*-féle C tényező függvénye
Δt_i	a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan (T_i), órában kifejezve
i	a szilárdulási időtartam (intervallum) sorszáma, i = 1, 2, 3…n

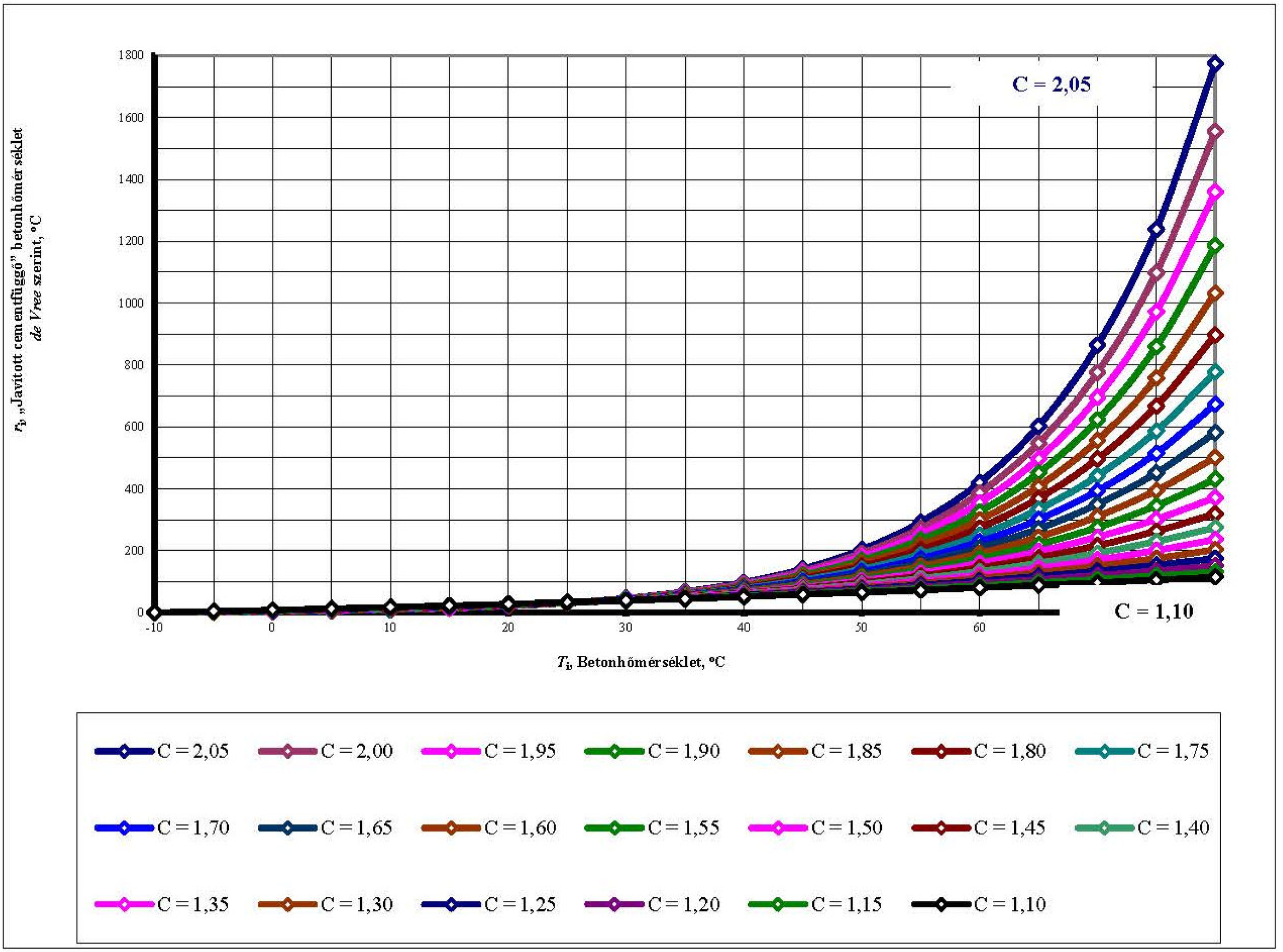
Az 1 óra szilárdulási időtartam alatt változatlan „javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérséklet *de Vree* szerint:

$$r_i = \int_{-10\ ^oC}^{T_i} \left(C^{(0,1 \cdot T_i - 1,245)}\right) dT = \frac{10}{\ln C} \cdot \left(C^{(0,1 \cdot T_i - 1,245)} - C^{-2,245}\right) \qquad [^oC]$$

ahol:

Ti	a beton átlaghőmérséklete a szilárdulási időtartam (1 óra) alatt, °C-ban kifejezve
C	a cement hőérzékenységét kifejező *de Vree*-féle tényező

A *de Vree*-féle r_i „javított cementfüggő” betonhőmérséklet a T_i = -10 °C hőmérsékleten a C tényező bármely értéke esetén nulla értéket vesz fel, tehát *R. de Vree – A. G. A. Saullal* megegyezően – feltételezi, hogy -10 °C hőmérsékleten a beton hidratációja megáll, azaz ha T_i = -10 °C, akkor r_i = 0,0 (*3. ábra*).



3. ábra: „Javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérséklet *de Vree* szerint (r_i) a betonhőmérséklet (T_i) és a cement hőérzékenységét kifejező C tényező függvényében, a (8) összefüggés alapján

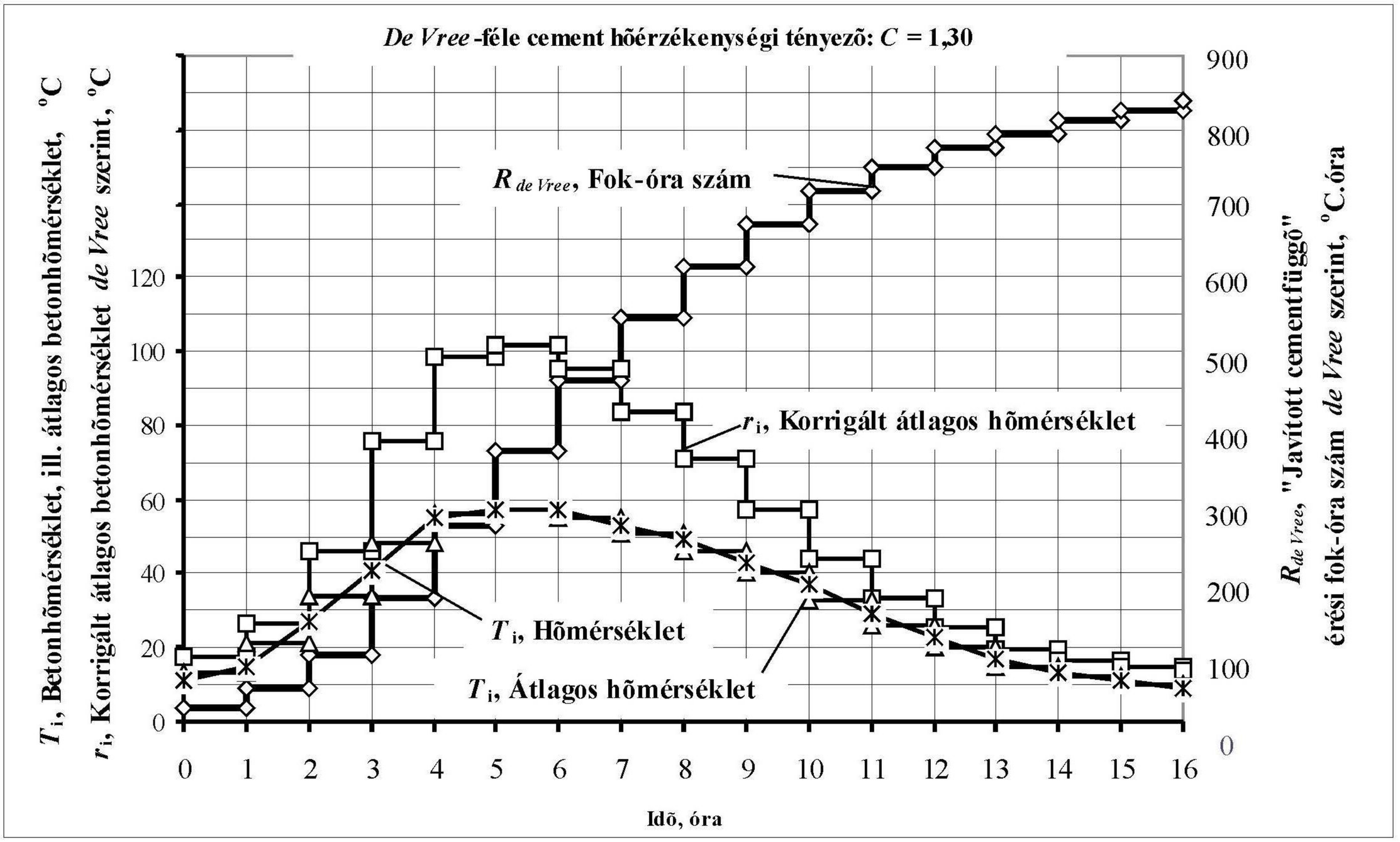
A *de Vree*-féle C tényezőt minden cementre külön kell meghatározni, mert az a cement összetételének, illetve klinker-tartalmának függvénye.

A *de Vree*-féle modell a fiatal beton szilárdulási folyamatának kifejezésére, például az előfeszítés, a kizsaluzás, az emelés, az utókezelési időtartam meghatározására előnyösen alkalmazható.

Az *1. táblázatban* számpélda található a *de Vree*-féle fok-óra szám ($R_{\text{de Vree}}$) meghatározására. A vizsgált időtartam 16 óra, amelyre a beton változó hőmérsékletét óránkénti átlagával (T_i) adtuk meg. Az átlagos „javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérsékletet a beton átlaghőmérsékletéből az r_i összefüggés felhasználásával számítottuk ki minden órára (az *1. táblázatban* soronként), annak feltételezésével, hogy a cement hőérzékenységét kifejező tényező értéke $C = 1{,}30$. Az óránkénti r_i hőmérsékleteket összegezve megkaptuk a *de Vree-féle* „javított cementfüggő" (korrigált) érési fok-óra számot, amely példánk esetén a vizsgált 16 órás időtartam végén $R_{\text{de Vree}} = 839{,}74$ °C·óra. Az *1. táblázatbeli* számpéldát grafikusan a *4. ábrán* rajzoltuk meg.

1. táblázat: Számpélda a *de Vree*-féle fok-óra szám számítására, ha a cement hőérzékenységi tényező értéke $C = 1{,}30$ (lásd a *4. ábrát*)

t_i, Idő, óra	T_i, Beton-hőmérséklet, °C	$\overline{T}_i$, Átlagos beton-hőmérséklet, °C	r_i, Korrigált átlagos beton-hőmérséklet, °C, ha $C = 1{,}30$	$R_{\text{de Vree}}$, *de Vree*-féle fok-óra szám, °C·óra
0	11	13	17,52	17,52
1	15	21	26,55	44,07
2	27	34	45,94	90,01
3	41	48	75,72	165,72
4	55	56	98,34	264,06
5	57	57	101,51	365,58
6	57	55	95,24	460,82
7	53	51	83,65	544,47
8	49	46	70,76	615,23
9	43	40	57,38	672,61
10	37	33	44,20	716,81
11	29	26	33,24	750,04
12	23	20	25,32	775,36
13	17	15	19,60	794,96
14	13	12	16,52	811,48
15	11	10	14,59	826,07
16	9	9	13,67	839,74



4. ábra: Számpélda (lásd az *1. táblázatot*) a *de Vree*-féle fok-óra szám számítására, ha a cement hőérzékenységi tényezőjének értéke $C = 1{,}30$

De Vree alapvetően követte *Saul* felfogását, amely szerint a beton átlagos nyomószilárdsága (f_{cm}) arányos a betonérési fok-óra szám (R) logaritmusával, illetve módosította annyiban, hogy arányos a *korrigált* betonérési fok-óra szám ($R_{de\ Vree}$) logaritmusával, vagy ami ugyanazt jelenti, – mert LN $R_{de\ Vree}$ = 2,302585·LOG $R_{de\ Vree}$ – természetes alapú logaritmusával:

$$f_{cm} = a \cdot (\mathrm{LN}\ R_{de\ Vree}) + b$$

A természetes alapú logaritmus beosztású abszcissza-tengely felett ábrázolt regressziós f_{cm} = f(LN $R_{de\ Vree}$) függvény egyes alakú, és $R_{de\ Vree}$-féle betonérési diagramnak (németül: Eichgraphik) nevezzük, de nevezik főképp Hollandiában – a C tényező számítási módszere után – *Cemij*-féle diagramnak is {►}. A betonérési diagramot általában a beton gyártója készíti el egy olyan betonszilárdsági tartományra, amely a beton alkalmazása során előfordul, de elkészítheti a cementgyár is különböző nyomószilárdsági osztályú „etalon” betonok esetére a saját cementjeivel.

A szabályozott *de Vree*-féle betonérési fok, illetve szilárdság becslési módszer leírását a holland NEN 5970:2001 szabvány tartalmazza. A hollandok 1984-ben a beton érési folyamatának vizsgálatára korszerű, több típusból álló, négy mérőhelyes elektronikus műszer sorozatot (MC 900 rijpheids – computer) fejlesztettek ki, amelynek használatát a betontechnológia legkülönbözőbb területein a kizsaluzás, az utókezelés befejezése, a feszítés, a terhelés, a vágás, fúrás, megmunkálás, az emelés megfelelő időpontjának meghatározásához stb. ajánlják (Iken – Lackner – Zimmer – Wöhnl, 2003).

Felhasznált irodalom

- NEN 5970:2001„Bepaling van de druksterkte-ontwikkeling van jong beton op basis van de gewogen rijpheid”, holland szabvány
- Iken, H.-W. – Lackner, R. R. – Zimmer, U. P. – Wöhnl, U.: „Handbuch der Betonprüfung. Anleitungen und Beispiele”, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2003.
- Papadakis, M. – Bresson, J.: „Contribution à l’ètude du facteur de maturité des liants hydrauliques application à l’industrie du béton manufacturé”, Revue des Matériaux, Ciments – Betons, Nr. 678, 3/1973, pp. 18-22.
- Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure”, Magazine of Concrete Research, 1951, No. 6., pp. 127-140.
- Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons”, beton, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

Jelmagyarázat:
{◄} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.
{►} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

A dolgozat folytatása ide kattintva olvasható.

A cikk rövidített változata megjelent a	BETON szakmai havilap	2011. január havi számának 20-21. oldalán

Fiatal beton szilárdulási folyamata
3. rész: CEMIJ[1]-féle módszer
a de Vree-féle tényező számítására

Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. Teil 3: CEMIJ-Methode für Berechnung des de Vree-Faktors
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part3: CEMIJ method for calculating the de Vree-factor
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 3: Cemij méthode de calcul du facteur de de Vree

Fogalom-tár

Dr. Kausay Tibor
http://www.betonopus.hu

Valamely adott cementhez tartozó tényleges *de Vree*-féle *C* tényező (◄) meghatározása habarcs vagy beton próbatestek szilárdulási folyamatának mérésén alapul. A méréshez azonos összetételű, de különböző hőmérsékleteken tárolt próbatest sorozatokat kell készíteni. Valamely sorozat mintáinak nyomószilárdságát különböző időpontokban meg kell határozni. A minta legalább három próbatestből álljon, egy nyomószilárdság adat tehát legalább három azonos hőmérsékleten tárolt, egy időpontban vizsgált próbatest nyomószilárdságának átlaga.

A *de Vree*-féle *C* tényező számítására kidolgozott *CEMIJ*-féle módszert a DAfStb Heft 422. kiadvány (*Bunke, N.,* 1991) 4.2.3 fejezetében is ismertetik, és annak alkalmazását *T. Vermeersch* (2005) Belgiumban készített diplomamunkája alapján számpéldán mutatjuk be.

A kísérleti beton 400 kg/m^3 adagolású CEM III/A 52,5 N LA jelű belga kohósalak-cementtel, $x = v/c = 188/400 = 0{,}47$ víz-cement tényezővel, a cement-adagolásra vett 0,3 tömeg% polikarboxilát alapú szuper-folyósító adalékszerrel, 4/7 mm szemnagyságú mészkő zúzottkő és 0/2 mm szemnagyságú kvarchomok adalékanyaggal készült. A beton próbakocka sorozatokat 30 °C, 20 °C, 15 °C és 10 °C hőmérsékleten, 80 % relatív páratartalmú klímaszekrényben tárolták. A három-három próbakockából álló minták nyomószilárdságát fiatal korban öt különböző időpontban és 28 napos korban vizsgálták. A számpélda kiindulási adatai az *1. táblázatban* szerepelnek.

[1] A *CEMIJ* (Cement Industrie IJmuiden) az *ENCI* (Eerste Nederlandse Cement Industrie) holland cementművek ijmuideni (Hollandia) cementgyárának a neve. Az ENCI a Heidelbergi Cement Csoport (*HeidelbergCement Group*) tagja.

1. táblázat: Számpélda alapadatai a *C* tényező számítására *T. Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

„A" kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, $T_i = 30$ °C		„B" kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, $T_i = 20$ °C	
Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2	Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2
9,17	6,1	16,00	6,2
10,90	9,5	17,83	7,6
12,00	12,3	19,83	9,5
13,17	14,1	21,67	11,5
14,30	16,0	25,50	14,6
672 (28 nap) *	54,0	672 (28 nap) *	54,8
„C" kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, $T_i = 15$ °C		„D" kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, $T_i = 10$ °C	
Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2	Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2
20,00	5,6	26,50	5,0
23,00	6,6	31,67	6,5
27,67	9,1	36,83	8,1
31,83	12,2	41,67	9,9
37,00	15,7	46,67	11,5
672 (28 nap) *	63,6	672 (28 nap) *	62,4
* A fiatal beton szilárdulási folyamatának értékelésébe a 28 napos korú beton vizsgálati eredményeit nem vontuk be.			

A kísérlet a fiatal korú betonra 4·5 = 20 idő-nyomószilárdság mérési értékpárt eredményezett.

A számítás során különböző *C* tényezők feltételezése mellett, mind a 20 mérési értékpár felhasználásával logaritmikus (természetes alapú logaritmus beosztású vízszintes tengely felett egyenes alakú) összefüggést keresünk a *de Vree*-féle fok-óra szám ($R_{de\ Vree}$) és a nyomószilárdság (f_{cm}) között, és kiszámítjuk az összefüggés korrelációs együtthatójának négyzetét. A feladat megoldását az a $C_{optimális}$ tényező adja, amelyikhez a legnagyobb r^2 korrelációs együttható négyzet tartozik.

A *C* tényező számításának lépései a következők:

1. Fel kell venni a *C* tényező valamely értékét, például először legyen $C = 1{,}10$.
2. A felvett *C* tényező felhasználásával minden T_i átlagos betonhőmérsékletre meg kell határozni a *de Vree*-féle „javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérsékletet (r_i). Például $C = 1{,}10$, $T_i = 30$ °C esetén $r_i = 39{,}31$ °C.
3. A *de Vree*-féle „javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérsékletet (r_i) megszorozva a Δt_i érési (szilárdulási) idővel, megkapjuk a teljes érési időhosszra vonatkozó *de Vree*-féle „javított cementfüggő" (korrigált) érési fok-óra számot ($R_{de\ Vree}$). A számítást valamennyi Δt_i érési (szilárdulási) időre el kell végezni. Például, ha $C = 1{,}10$, $T_i = 30$ °C és $\Delta t_i = 9{,}17$ óra, akkor $R_{de\ Vree} = r_i \cdot \Delta t_i = 39{,}31 \cdot 9{,}17 = 360{,}47$ °C·óra.
4. Kiszámítjuk a meghatározott *de Vree-féle* „javított cementfüggő" (korrigált) érési fok-óra számok ($R_{de\ Vree}$) természetes alapú logaritmusát (LN $R_{de\ Vree}$), amelyhez mint független változóhoz (x_i) hozzárendeljük függő változóként (y_i) a nyomószilárdság átlagértékét (f_{cm}).

Például $C = 1{,}10$, $T_i = 30$ °C, $\Delta t_i = 9{,}17$ óra, illetve $R_{de\ Vree} = 360{,}47$ °C·óra esetén $x_i = \text{LN}\ R_{de\ Vree} = 5{,}887$ és $y_i = f_{cm} = 6{,}1$ N/mm^2.

A példa esetén 20 darab LN $R_{de\ Vree}$ – f_{cm} értékpárral rendelkezünk (*1. táblázat*), amelyeknek az adott C tényezőhöz tartozó értékeit grafikusan a természetes alapú logaritmikus beosztású abszcissza-tengellyel és a lineáris beosztású ordináta-tengellyel rendelkező koordináta rendszerben ábrázolhatjuk.

Következő feladatunk a felvett C tényezőhöz tartozó 20 darab LN $R_{de\ Vree}$ – f_{cm} értékpárra rajzolt regressziós egyenes „*a*” regressziós együtthatójának, „*b*” regressziós y-tengelymetszetének, valamint az ezekkel kapott regressziós egyenes korrelációs együtthatója négyzetének (r^2) meghatározása.

A korrelációs együttható r^2 négyzete az $R_{de\ Vree}$ mért fok-óra számhoz (mint x_i értékhez) tartozó mért $f_{cm,i,mért}$ nyomószilárdság (mint y_i érték) és a regressziós függvényből számított $f_{cm,i,számított}$ nyomószilárdság (mint Y_i) érték közötti kapcsolat szorosságát fejezi ki:

$$r^2 = \frac{\left(\sum (y_i - \overline{y}) \cdot (Y_i - \overline{Y})\right)^2}{\sum (y_i - \overline{y})^2 \cdot \sum (Y_i - \overline{Y})^2}$$

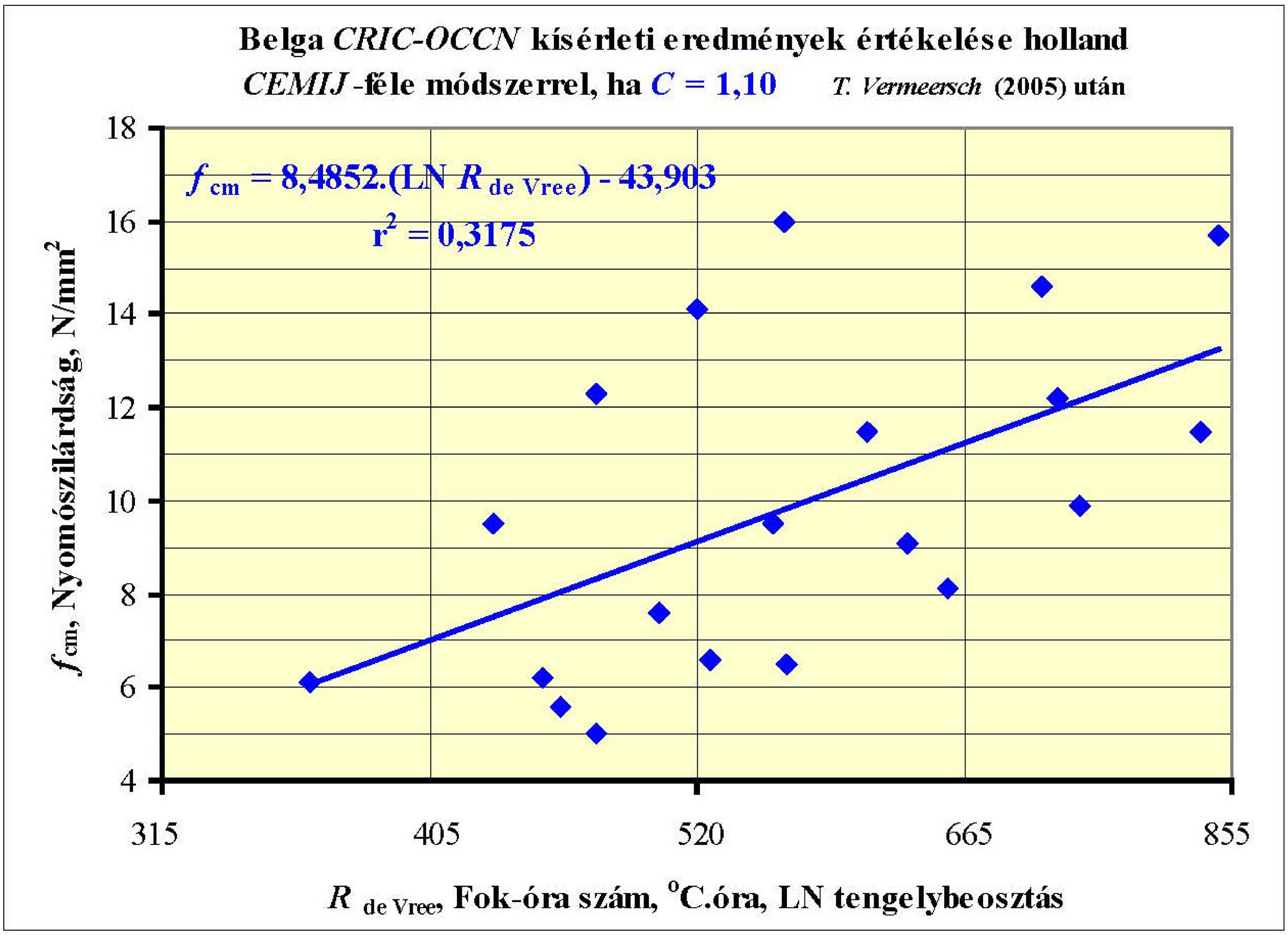
A kapcsolat annál szorosabb, minél inkább az 1,0-hez tart a korrelációs együttható négyzetének (r^2) az értéke.

Megjegyzés: A korrelációs együttható r betűjele véletlenül ugyanaz, mint a *de Vree*-féle „javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérséklet r_i betűjele, de a nemzetközi irodalomban így használják, ezért nem változtattuk meg.

A példa esetén a felvett $C = 1{,}10$ tényezőhöz tartozó regressziós egyenes egyenlete:

$f_{cm} = 8{,}4852 \cdot (\text{LN}\ R_{de\ Vree}) - 43{,}903$

és a korrelációs együttható négyzete $r^2 = 0{,}3175$, amelyet az *1. ábrán* ($R_{de\ Vree}$-féle betonérési diagram) tüntettünk fel.



1. ábra: Példa szerinti összefüggés az $R_{\text{de Vree}}$-féle fok-óra szám és a beton f_{cm} nyomószilárdsága között ($R_{\text{de Vree}}$-féle betonérési diagram), ha a cement hőérzékenységi tényező értéke $C = 1{,}10$

7. Az 1. – 7. lépéseket újabb C tényezőkkel megismételve, az $f_{cm} = \mathrm{f}\ (\mathrm{LN}\ R_{\text{de Vree}})$ regressziós függvény és a hozzá tartozó korrelációs együttható négyzet meghatározását minél több felvett C tényező esetére el kell végezni. Példánk esetén a felvett C tényezőkhöz a *2. táblázatban* ($y_r2_{,i}$) adatként feltüntetett r^2 korrelációs együttható négyzeteket kaptuk.

2. táblázat: A felvett C tényezőkhöz tartozó r^2 korrelációs együttható négyzetek a példa esetén. Lásd a *2. ábrát*. *T. Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

C tényező	$R_{\text{de Vree}} - f_{\text{cm}}$ regressziós függvény korrelációs együtthatójának négyzete (r^2), (lásd a *3. ábrát*). A $C - r_{f\text{cm}}^2$ koordinátarendszerben (lásd a *2. ábrát*)		C tényező	$R_{\text{de Vree}} - f_{\text{cm}}$ regressziós függvény korrelációs együtthatójának négyzete (r^2), (lásd a *3. ábrát*). A $C - r_{f\text{cm}}^2$ koordinátarendszerben (lásd a *2. ábrát*)	
	adat ($y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$)	függvény érték ($Y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$)		adat ($y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$)	függvény érték ($Y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$)
1,10	0,3175	0,3180	1,65	0,9404	0,9384
1,15	0,3819	0,3746	**C_{opt}: 1,66**	**0,9404**	**0,9389**
1,20	0,4536	0,4475	1,67	0,9401	0,9389
1,25	0,5308	0,5284	1,70	0,9365	0,9366
1,30	0,6105	0,6110	1,75	0,9236	0,9250
1,35	0,6890	0,6899	1,80	0,9041	0,9056
1,40	0,7619	0,7613	1,85	0,8801	0,8807
1,45	0,8252	0,8222	1,90	0,8534	0,8525
1,50	0,8757	0,8708	1,95	0,8254	0,8236
1,55	0,9116	0,9064	2,00	0,7970	0,7962
1,60	0,9327	0,9287	2,05	0,7690	0,7725

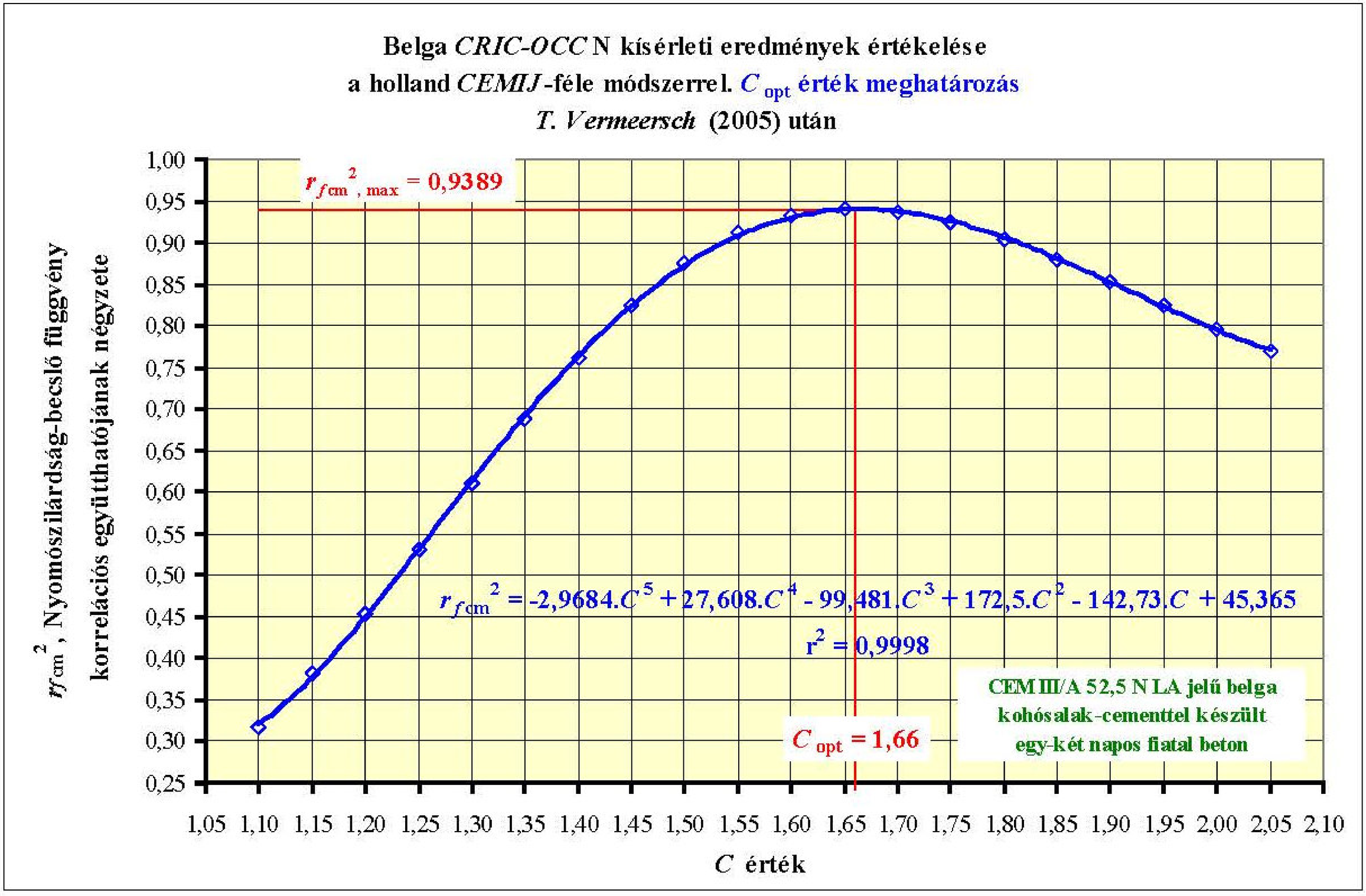
8. A meghatározott C-r^2 értékpárokat – a *2. táblázat* jelölésével C-$y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$ adatpontokat – (példánk esetén 22 darab) a *2. ábrán* lineáris koordinátarendszerben ábrázoltuk, és az ábrázolópontokra jól illeszkedő ötödfokú polinom alakú regressziós görbét fektettünk, amelynek egyenlete:

$$r_{f\text{cm}}^2 = -2{,}9684 \cdot C^5 + 27{,}608 \cdot C^4 - 99{,}481 \cdot C^3 + 172{,}5 \cdot C^2 - 142{,}73 \cdot C + 45{,}365$$

és korrelációs együtthatójának négyzete: $r^2 = 0{,}9998$.

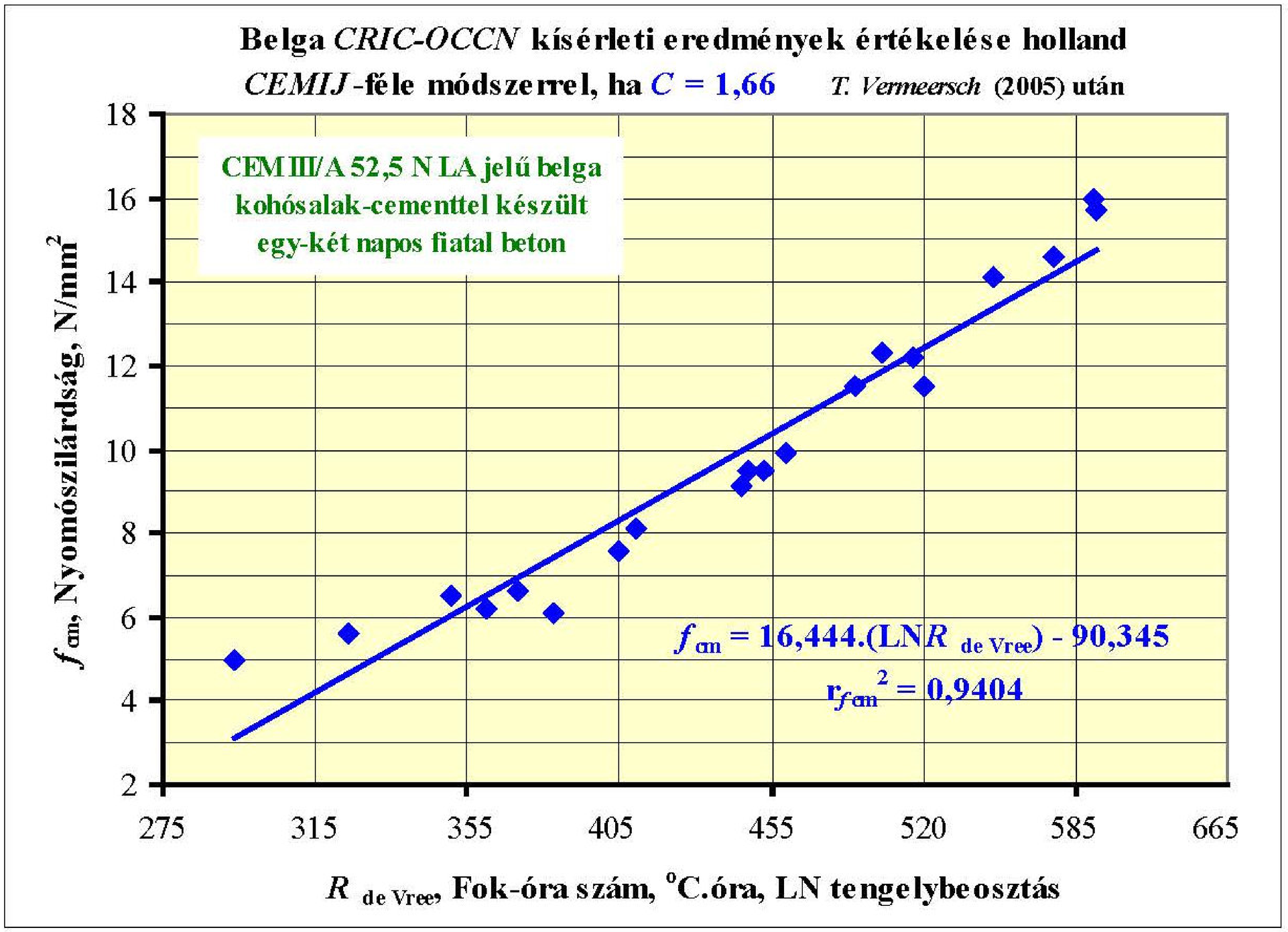
A regressziós ötödfokú polinom C abszcissza értékekhez tartozó $r_{f\text{cm}}^2$ ordináta értékeit a *2. táblázatban* $Y_{\text{r}}2_{,\text{i}}$ függvény értékként jelöltük.

Megállapíthatjuk, hogy a regressziós ötödfokú polinom a legnagyobb, $Y_{\text{r}}2_{,\text{max}} = r_{f\text{cm}}^2{}_{,\text{max}}$ értéket ($r_{f\text{cm}}^2{}_{,\text{max}} = 0{,}9389$) a $C_{\text{opt}} = 1{,}66$ helyen veszi fel; és ezen a helyen van az $R_{\text{de Vree}}$-féle fok-óra szám és a beton f_{cm} nyomószilárdsága közötti összefüggések regressziós egyenese korrelációs együtthatója négyzetének – mint a *2. ábra* adatpontjának – is a legnagyobb értéke ($y_{\text{r}}2_{,\text{max}} = r_{f\text{cm}}^2{}_{,\text{max}} = 0{,}9404$). Lásd a *2. táblázatot* és a *3. ábrát*.



2. ábra: A példa szerinti C_{opt} érték meghatározása. *T. Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

9. A példa esetén tehát a beton átlagos nyomószilárdsága (f_{cm}) akkor becsülhető meg a legmegbízhatóbban a *de Vree*-féle fok-óra számból ($R_{de\ Vree}$), ha a számítást a C = 1,66 értékű C tényezővel végezzük. A C = 1,66 tényezőhöz tartozó, a példa esetén érvényes $R_{de\ Vree} - f_{cm}$ nyomószilárdság becslő függvény a *3. ábrán* látható.



3. ábra: A C = 1,66 tényezőhöz tartozó, a példa esetén érvényes $R_{\text{de Vree}} - f_{\text{cm}}$ nyomószilárdság becslő függvény, mint a példa megoldása. *T. Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

Felhasznált irodalom

- Bunke, N. (szerkesztette): „Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweis als Ergänzung zu DIN 1048”, DAfStb, Heft 422, Beuth Verlag GmbH, Berlin-Köln, 1991.
- Iken, H.-W. – Lackner, R. R. – Zimmer, U. P. – Wöhnl, U.: „Handbuch der Betonprüfung. Anleitungen und Beispiele”, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2003.
- Vermeersch, T.: Semi-automatische bepaling van de ontkistingssterkte toegepast op het productieproces van Prefadim Belgium NV. Diplomamunka. Katholieke Hogeschool Brugge – Oostende, 2005.
- Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons”, beton, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

Jelmagyarázat:
{◄} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.
{►} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

A dolgozat folytatása ide kattintva olvasható.

A cikk rövidített változata megjelent a	BETON szakmai havilap	2011. február havi számának 19-21. oldalán

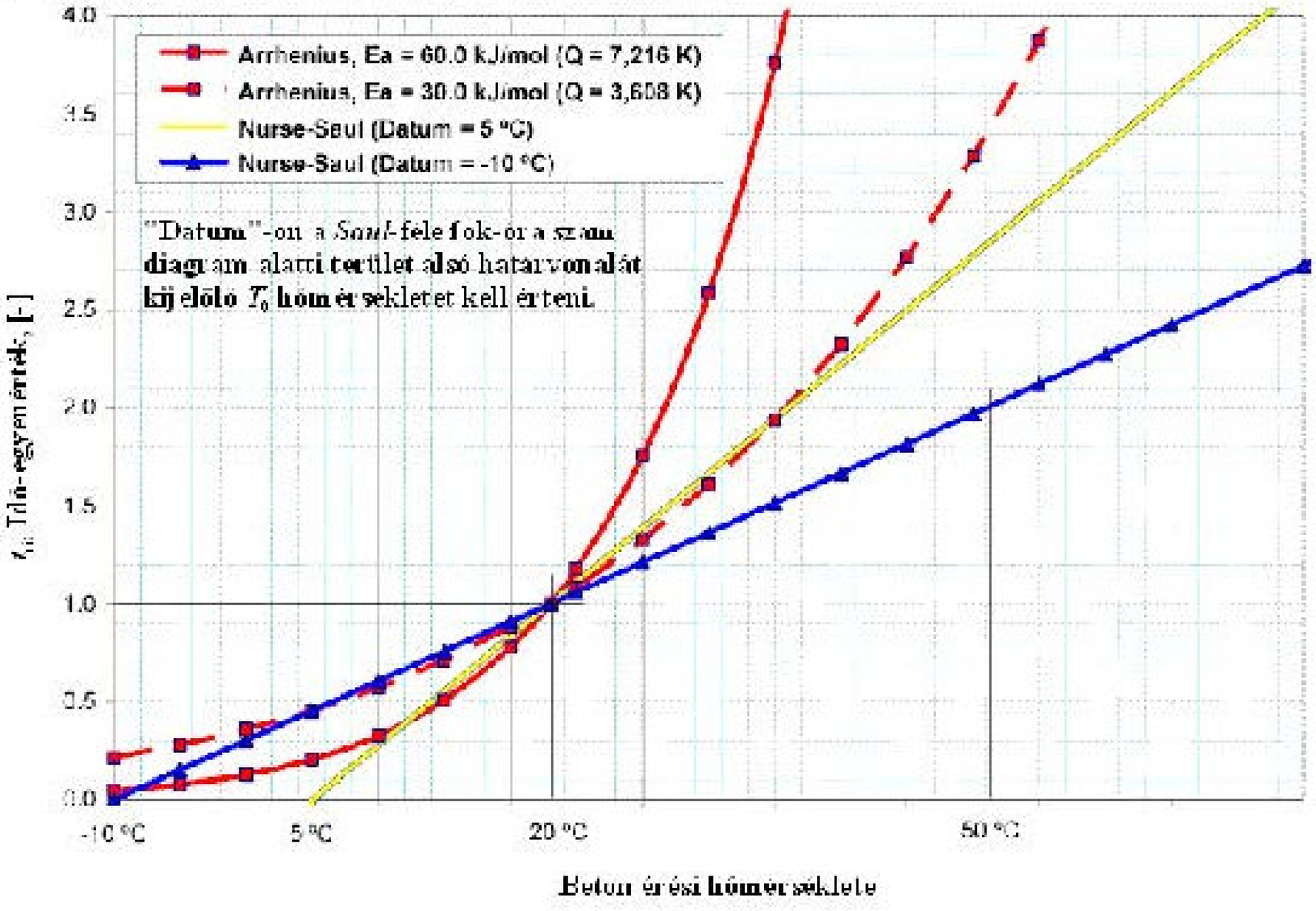
	Fiatal beton szilárdulási folyamata **4. rész: Arrhenius-féle modell**	
Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. Teil 4: Modell nach Arrhenius	
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 4: Model for Arrhenius	
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 4: Modèle pour Arrhenius	

Fogalom-tár

Dr. Kausay Tibor
http://www.betonopus.hu

Svante Arrhenius (1859-1927) svéd kémiai Nobel-díjas (1903) fizikus és kémikus 1888-ban dolgozta ki a tételét, amelyet beton érési-szilárdulási becslő modellként először 1977-ben *P. Freiesleben Hansen* és *E. J. Pedersen* alkalmazott. Míg a *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés {◄} alakja lineáris, addig az *Arrhenius*-féle összefüggés exponenciális görbét eredményez (*1. ábra*).

Az *1. ábrán* a különböző feltételeknek megfelelő *Saul*- és *Arrhenius*-féle idő-egyenérték függvények elhelyezkedését vethetjük össze. Az *1. ábra* szerint a $T_0 = 5$ °C alsó hőmérséklettel (Datum = 5 °C) jellemzett *Nurse-Saul*-féle függvény a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban jó közelítését adja az *MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2)* szabványban is szereplő $E_a = 30{,}0$ kJ/mol jellemzőjű *Arrhenius*-féle függvénynek.



1. ábra: Különböző feltételeknek megfelelő *Saul*- és *Arrhenius*-féle idő-egyenérték függvények összevetése. Forrás: *Report IPRF*, 2006.

Az *Arrhenius*-féle tétel a kémiai kinetikában a reakció-sebességi együttható (k) értékét adja meg az anyaghőmérséklet (T) függvényében:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R_u \cdot \Delta T}} = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R_u}\cdot\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)} = A \cdot e^{\frac{E}{R_u}\cdot\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)} \qquad (1)$$

ahol:

A preexponenciális tényező (frekvencia faktor)

E_a aktiválási energia, J/mol

amely $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 °C) esetén $E_a = 33500$ J/mol

$T < 293{,}15$ K (< 20 °C) esetén $E_a = 33500 + 1470 \cdot (T_0 - T)$ J/mol

vagy a cementfajta függvényében:

CEM I esetén: $E_A = 25000\text{-}45000$ J/mol

CEM III esetén: $E_A = 50000\text{-}75000$ J/mol

R_u univerzális gázállandó (8,3142 J/mol·K)

E_a/R_u $= 33500/8{,}3142 = 4029$ K ~ 4000 K, ha $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 °C)

E_a/R_u $= (33500 + 1470 \cdot 20)/8{,}3142 = 7565$ K, ha $T = 273{,}15$ K (0,0 °C)

T_0 az anyag referencia-hőmérséklete (293,15 K = 20 °C), kelvinben kifejezve

T az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan anyaghőmérséklet vagy átlagos anyaghőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), (273,15 K + T_i = 0,0 °C + T_i), kelvinben kifejezve

T_i az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan anyaghőmérséklet vagy átlagos anyaghőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), °C-ban kifejezve

Az (1) szerinti *Arrhenius*-féle összefüggés megtalálható ASTM C 1074-04 szabvány 6.3 fejezetében, és az E_a/R állandót a szabvány A1.3 melléklete (Annex A1.3), valamint X1.3 függeléke (Appendix X1.3) értelmezi.

Ha a vizsgálati anyag hőmérséklete (itt már nevezhetjük betonhőmérsékletnek) $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 °C), akkor az *Arrhenius*-féle formula a CEB-FIP Model Code 1990 szerint a következő alakot ölti:

$$k = A \cdot e^{\frac{E}{R}\cdot\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)} = A \cdot e^{4000\cdot\left(\frac{1}{293{,}15}-\frac{1}{273{,}15+T_i}\right)} = A \cdot e^{\left(13{,}65-\frac{4000}{273{,}15+T_i}\right)} \qquad (2)$$

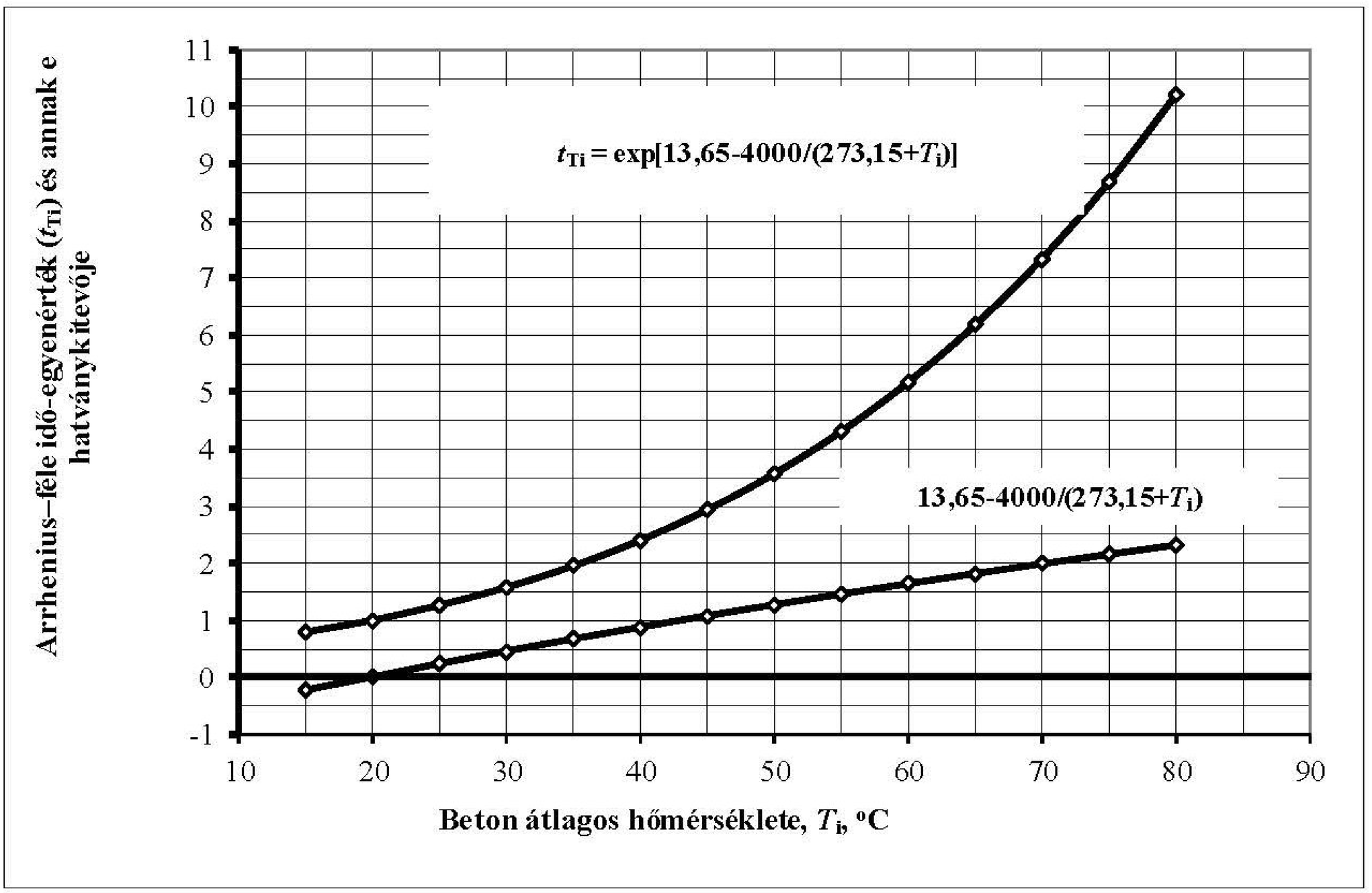
Az *Arrhenius*-féle formulában a k/A hányados az **idő-egyenértéket (t_{Ti})** fejezi ki, amelynek összefüggése – ha a vizsgálati anyag hőmérséklete ≥ 20 °C – a következő, és amely $T_i = 20$ °C vizsgálati anyaghőmérsékleten $t_{Ti} = t_{20°C} = 1{,}0$ értéket vesz fel (*27. ábra*):

$$\frac{k}{A} = t_{T_i} = e^{\left(13{,}65-\frac{4000}{273{,}15+T_i}\right)} \quad [\textit{nevezetlen szám}] \qquad (3)$$

Meg kell jegyezni, hogy az *Arrhenius*-féle (2) és (3) jelű összefüggést a szabványok olykor 20 °C alatti hőmérsékleten is alkalmazzák, illetve nem tiltják (például: CEB-FIP Model Code 1990; MSZ EN 1992-1-1:2010; ASTM C 1074-04), és ezért az *1. táblázatban* és a *2. ábrán* az idő-egyenértéket 15 °C hőmérséklet esetére is megadtuk.

1. táblázat: Példa *a* t_{Ti} idő-egyenérték számítására a (3) összefüggés alapján, feltételezve, hogy a hőmérséklet $T_i \geq 15$ °C (*2. ábra*)

T_i a beton átlagos hőmérséklete egy napon át, °C	e hatványkitevője a t_{Ti} idő-egyenérték összefüggésben	t_{Ti} idő-egyenérték (20 °C hőmérsékletű napra vonatkoztatva, az e hatványa)
15	-0,232	0,793
20	0,000	1,000
25	0,234	1,264
30	0,455	1,577
35	0,669	1,953
40	0,877	2,403
45	1,077	2,937
50	1,272	3,567
55	1,460	4,308
60	1,643	5,173
65	1,821	6,178
70	1,993	7,340
75	2,161	8,677
80	2,323	10,210



2. ábra: *Arrhenius*–féle idő-egyenérték (t_{Ti}) összefüggés és abban az e hatványkitevője a hőmérséklet függvényében

A 20 °C betonhőmérsékletre vonatkoztatott **helyettesítő időtartam az** *Arrhenius*–**féle összefüggés alapján**, portlandcement esetén:

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} t_{T_i} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n} e^{\left(13,65 - \frac{4000}{273+T_i}\right)} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{4}$$

ahol:

T_i az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan betonhőmérséklet vagy átlagos betonhőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), °C-ban kifejezve

Δt_i a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan vagy átlagával jellemezhető (T_i), napban vagy órában kifejezve

A t_T helyettesítő időtartam számítására a (4) *Arrhenius*–féle összefüggés alapján a *2. táblázatban* mutatunk be példát.

2. táblázat: Példa a helyettesítő időtartam számítására a (4) *Arrhenius*–féle összefüggés alapján

Érlelési idő, óra	Mért hőmérséklet, °C	Δt_i, óra	Átlagos hőmérséklet, T_i, °C	Idő-egyenérték, t_{Ti}	Helyettesítő időtartam, t_T, óra
0,5	20	0,5	20,5	1,029	1,03
1,0	21	0,5			
1,5	22	0,5	22,5	1,128	2,16
2,0	23	0,5			
2,5	24	0,5	24,5	1,235	3,39
3,0	25	0,5			
3,5	27	0,5	27,5	1,413	4,80
4,0	28	0,5			
4,5	29	0,5	29,5	1,543	6,35
5,0	30	0,5			
5,5	31	0,5	31,5	1,682	8,03
6,0	32	0,5			
6,5	33	0,5	33,0	1,794	9,82
7,0	33	0,5			
7,5	34	0,5	34,0	1,872	11,70
8,0	34	0,5			
8,5	35	0,5	35,0	1,953	13,65
9,0	35	0,5			
9,5	36	0,5	36,0	2,037	15,69
10,0	36	0,5			
10,5	36	0,5	36,5	2,080	17,77
11,0	37	0,5			
11,5	37	0,5	37,0	2,123	19,89
12,0	37	0,5			

Minthogy az eredeti *Saul*-féle formula {◄} alkalmazása 20 °C hőmérséklet felett ellentmondásokra vezet, a *CEB-FIP Model Code 1990* kidolgozói a szabályozásba az

Minthogy az eredeti *Saul*-féle formula {◄} alkalmazása 20 °C hőmérséklet felett ellentmondásokra vezet, a *CEB-FIP Model Code 1990* kidolgozói a szabályozásba az *Arrhenius*-féle törvényt emelték be. A (3) összefüggést a *CEB-FIP Model Code 1990* nyomán az *MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2)* szabvány is tartalmazza.

Az európai szabványok a t_T helyettesítő időtartam összefüggést a 28 napnál fiatalabb szabványosan érlelt és az előre gyártott, hőérlelt beton szilárdság becsléséhez 0-80 °C hőmérsékleti tartományban alkalmazzák.

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. és 2.1.8.2. fejezete, valamint D. függelékének d.4.2.1. szakasza szerint a (3) összefüggés lényegében a mai értelemben vett CEM I és CEM II típusú portlandcementek esetén használható. Ettől a korlátozástól az *MSZ EN 1992-1-1:2010* (Eurocode 2) szabvány 3.1.2 fejezetének (6) bekezdése érdemben nem tér el.

HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK ÉS JELENTÉSEK

ASTM C 1074-04 „Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", 2004;
A szabvány korábbi változata 1993-ban, illetve 1998-ban jelent meg „Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method" címmel

CEB-FIP Model Code 1990 Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information No. 203-205, Final Draft, Chapters 4-10, Lausanne 1991; First published by Thomas Telford Services Ltd., London, 1993.

MSZ EN 1992-1-1:2010 Eurocode 2: „Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok"

Report IPRF-01-G-002-03-6 „Using Maturity Testing for Airfield Concrete Pavement Construction and Repair", An Research Report IPRF. Innovative Pavement Research Foundation. Airport Concrete Pavement Technology Program. Skokie (USA, Illinois) 2006.

HIVATKOZÁSOK

Arrhenius, S.:„On the Reaction Velocity of the Inversion of Cane Sugar by Acids" *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, No. 4, 1889, pp. 226-232 (as translated and published in Margaret H. Back and Keith J. Laidler, 1967, „Selected Readings in Chemical Kinetics" *Pergamon*, Oxford, 1967).

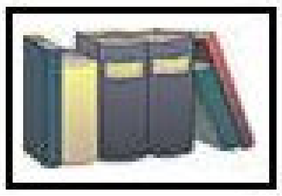
Freiesleben Hansen, P. – Pedersen, E. J.: „Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete", *Nordisk Betong*, 1, 1977, pp. 19-34.

Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure", *Magazine of Concrete Research*, 1951, No. 6., pp. 127-140.

Jelmagyarázat:
{◄} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.
{►} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

[A dolgozat folytatása ide kattintva olvasható.]

A cikk megjelent a	BETON szakmai havilap	2011. március havi számának 18-20. oldalán

	Fiatal beton szilárdulási folyamata **5. rész: Szilárdulási idő tényező**	
Németül:	Festigkeitsentwicklung des jungen Betons. Teil 5: Koeffizient für Alter des Betons im Festigungsprozeß	
Angolul:	Hardening process of young concrete. Part 5: Coefficient which depends on the age of concrete in the hardening process	
Franciául:	Processus de durcissement du béton jeunes. Partie 5: Coefficient qui dépend de l'âge de béton dans le processus de durcissement	

Fogalom-tár

Dr. Kausay Tibor
betonopu@t-online.hu, http://www.betonopus.hu

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezetének (2.1-54) összefüggése a 28 naposnál fiatalabb beton szilárdsági tulajdonságainak változását – a 28 napos korú, szabványosan tárolt és utókezelt (MSZ EN 12390-2:2009) beton átlagos nyomószilárdságára vonatkoztatva – az idő függvényében a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényezővel veszi figyelembe:

$$\beta_{cc}(t) = exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t_T / t_{1,T}} \right)^{1/2} \right] \right\} = e^{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t_T / t_{1,T}} \right)^{1/2} \right]} \qquad (1)$$

ahol:

s cement fajtájától függő tényező, lásd az *1. táblázatot*
t_T helyettesítő időtartam, napban kifejezve
$t_{1,T}$ 1 nap, a mértékegységre tekintettel szerepeltetnek az összefüggésben.

Eszerint a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényező a hőmérséklet befolyásolta helyettesítő időtartamnak (t_T) és a cement fajtájától függő együtthatónak (s) a függvénye (*1. ábra*).

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezete szerint az (1) összefüggés az ISO 2736-2:1986 szerint szabványosan készített és (20 ± 2) °C hőmérsékleten, kizsaluzás után vízben vagy legalább 95 % relatív nedvességtartalmú laboratóriumi körülmények között – úgy, hogy a vizsgálatig a próbatestek felületét állandóan vízfilm vonja be – tárolt próbatestek esetén érvényes. (A visszavont ISO 2736-2:1986 szabványt az ISO 1920-3:2004 szabvány váltotta fel, mai európai megfelelője az MSZ EN 12390-2:2009 szabvány.)

Alkalmazva a $t = t_T/t_1$ egyszerűsítést, a CEB-FIP Model Code 1990 modell-kódból átvett (1) összefüggés az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezetének (6) bekezdésében – (3.2) jel alatt – a következő alakot ölti, és ugyancsak a 28 napos korú, szabványosan tárolt és utókezelt beton átlagos nyomószilárdságára vonatkoztatva az idő függvényében a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényezőt adja meg:

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} = e^{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right]} \tag{2}$$

A (2) összefüggésben a t betonkor alatt a t_T helyettesítő időtartam értendő.

A (2) összefüggés az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 10.3.1.1 fejezetének (3) bekezdése szerint az előregyártott vasbeton szerkezeti elemek hőérlelése esetén is érvényes, ha a beton 28 napnál fiatalabb. Megjegyzik, hogy ebben az esetben a $\beta_{cc}(t)$ tényezőt általában 1,0-ra kell korlátozni. Ez azt jelenti, hogy a (2) jelű összefüggés hőérlelt betonok esetén is akkor alkalmazható, ha azok 28 napnál fiatalabbak (*1. ábra*).

Kanstad, T. – Hammer, T. A. – Bjøntegaard, Ø. – Sellevold, E. J. (1999) a korai szilárdulási folyamat jobb leírására a (2) összefüggést a következőképpen módosította, és a húzószilárdság, valamint a rugalmassági modulus alakulásának kifejezésére is alkalmazta (*Röhling, S.*, 2009, *Atrushi, D. S.*, 2003):

$$\beta_{cc}(t) = exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28 - t_0}{t - t_0} \right)^{c} \right] \right\} \tag{3}$$

ahol:

- t_0 a hőfejlődés és a szilárdulás kezdetének a cementfajtától és a beton összetételétől függő időpontja
- c kísérletekkel meghatározandó függvényállandó

A t_0 időpont figyelembevétele főként akkor előnyös, ha a kötéskésleltető adalékszer hatását, vagy a hidratáció első néhány óráját jellemző pangó szakasznak (németül: dormante Periode) a hatását nem kívánjuk elhanyagolni. A pangó szakasz a kezdetleges trikalcium-aluminát-szulfát hidratáció (az elsődleges ettringit képződés kezdetének) ideje, amely szakasz a kalcium-szilikát-hidrát fázisok képződésének kezdetéig, lényegében nem egészen a *Vicat*-féle kötésidő végéig tart. A pangó szakasz alatt a beton már nem tömöríthető, de még nem is szilárd.

1. táblázat: A cement fajtájától függő tényező (s) értéke a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényező a (2) – (4) összefüggésben

CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód 2.1.6.1. fejezete és az *MSZ EN 1992-1-1:2010* (Eurocode 2) szabvány 3.1.2 fejezetének (6) bekezdése szerint	
s	ha a cement fajtája
0,20	CEM 42,5 R; CEM 52,5 N; CEM 52,5 R [a)]
0,25	CEM 32,5 R; CEM 42,5 N [b)]
0,38	CEM 32,5 N [c)]

Megjegyzés:

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezete és d.4.2.1 függeléke az

a) szerinti cementek csoportját *RS* osztályú, gyorsan szilárduló és nagyszilárdságú (rapid hardening high strength cements), akkori jelöléssel CE 52,5;

b) szerinti cementek csoportját *R* osztályú, gyorsan szilárduló (rapid hardening cements), akkori jelöléssel CE 42,5 R, és *N* osztályú, normál módon szilárduló (normal hardening cements), akkori jelöléssel CE 32,5 R és CE 42,5;

c) szerinti cementek csoportját *SL* osztályú, lassan szilárduló (slowly hardening cements), akkori jelöléssel CE 32,5 cementnek nevezi;

MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2 fejezetének (6) bekezdése az

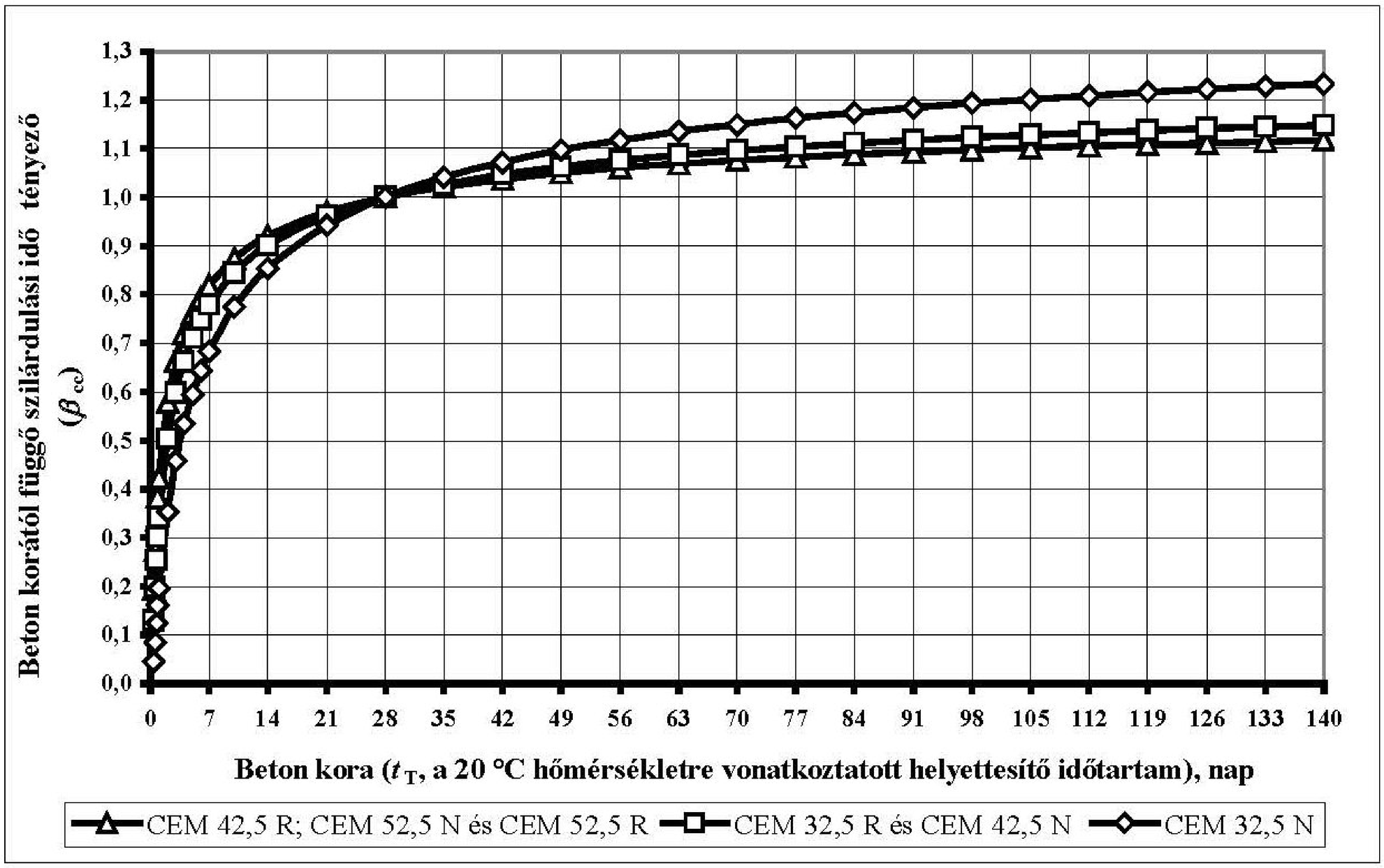
a) szerinti cementek csoportját *R* osztályú,

b) szerinti cementek csoportját *N* osztályú,

c) szerinti cementek csoportját *S* osztályú cementnek nevezi.

Ezek a betűjelek nem tévesztendők össze az MSZ EN 197-1:2000 cement-szabvány szerinti betűjelekkel.

Rostasy, F. S. – Krauß, M. – Budelmann, H. (2002) szerint, lásd *Röhling, S.* (2009)	
s	ha a cement fajtája
0,17 – 0,22	CEM I 52,5 (C60/75 osztályú betonok)
0,20 – 0,23	CEM I 42,5 R (C40/50 osztályú betonok)
0,28 – 0,45	CEM III/B 32,5 NW, kis hőfejlesztésű kohósalakcement (C40/50 osztályú betonok)



1. ábra: $\beta_{cc}(t)$, szilárdulási idő tényező függvénye

Az (1) és (2) összefüggés a CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód és az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány szerint 20 °C átlagos hőmérsékletre vonatkoztatva és az MSZ EN 12390-2:2009 szerinti utókezelés esetén érvényes. Az MSZ EN 12390-2:2009 szabvány 5.5. fejezetében a próbatestek utókezeléséről (tárolásáról) a következőket olvashatjuk: a próbatesteket legalább 16 órán át, de 3 napnál nem hosszabb ideig – védve ütéstől, rázástól, vízvesztéstől – a sablonban, (20 ± 5) °C hőmérsékletű térben kell tárolni. A próbatesteket a sablonból kivéve közvetlenül a vizsgálatig (20 ± 2) °C hőmérsékletű vízben vagy (20 ± 2) °C hőmérsékletű és legalább 95 %-os relatív páratartalmú klímakamrában kell tárolni.

A CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód 2.1.6.1. fejezetének (2.1-53) összefüggése és az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezete (6) bekezdésének (3.1.) összefüggése szerint a 28 naposnál fiatalabb beton átlagos nyomószilárdságát a t időpontban – a szilárdulási idő tényező $\beta_{cc}(t)$ és a beton 28 napos átlagos nyomószilárdsága (f_{cm}) felhasználásával – a következő összefüggéssel lehet megbecsülni:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} = e^{s\left[1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}\right]} \cdot f_{cm} \qquad (4)$$

Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezete (6) bekezdésben kihangsúlyozzák, hogy ha a beton 28 napos megkövetelt nyomószilárdsága nem teljesül, akkor a (2) és (4) alatti összefüggést használni, továbbá ezekkel a nem megfelelő referencia-szilárdság meglétét visszamenőlegesen, az utószilárdulás figyelembevételével igazolni nem szabad.

Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 10.3.1.1 fejezetének (3) bekezdése szerint a 28 naposnál fiatalabb (t < 28 napos) hőérlelt előregyártott vasbeton szerkezeti elem betonjának $f_{cm}(t)$ nyomószilárdsága ugyancsak a (4) jelű összefüggéssel számítható, amely összefüggésben a t a hőmérséklettel módosított t_T betonkor.

Példaképpen – MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány szerinti (4) összefüggés, valamint az *1. táblázat* alapján – a *2. táblázatban* számítsuk ki annak a CEM 32,5 N jelű cementtel készítendő betonnak a kizsaluzhatósági idejét, amelytől megköveteljük, hogy a teherhordó zsaluzat eltávolításának időpontjában a beton nyomószilárdsága érje el a 28 napos nyomószilárdság 80 %-át. A betonozás tervezésének idején felkészülünk arra, hogy a fiatal beton átlagos hőmérséklete a kizsaluzásig – az időjárástól függően, és az egyszerűség kedvéért – például 15 °C vagy 20 °C vagy 25 °C lesz.

$$\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} = \beta_{cc}(t) = 0{,}8 = e^{s\left[1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}\right]}$$

$$\frac{ln\,0{,}8}{s} = \frac{-0{,}2231435}{0{,}38} = -0{,}5872198 = 1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}$$

$$\frac{28}{t_T} = 1{,}5872198^2 = 2{,}5192667$$

$t_T = 11{,}114345$ nap, helyettesítő idő

2. táblázat: Példa a kizsaluzhatóság időpontjának kiszámítására

T Beton átlagos hőmérséklete a készítéstől a kizsaluzásig °C	t_{Ti} Idő-egyenérték	$\Delta t_{kizsaluzási} = t_T/t_{Ti}$ Kizsaluzhatóság időpontja nap
15	0,793	14,0
20	1,000	11,1
25	1,264	8,8

Tehát a példa szerinti beton 15 °C átlagos hőmérséklet esetén 14 napos, 20 °C átlagos hőmérséklet esetén 11 napos, illetve 25 °C átlagos hőmérséklet esetén 9 napos korban zsaluzható ki. Arról természetesen meg kell győződni, hogy az adott nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori nyomószilárdságának 80 %-a a teherbírás szempontjából kizsaluzáskor elegendő-e. Így például

- a C20/25 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0{,}8 \cdot 1{,}4 \cdot (20+8) = 31{,}4$ N/mm^2;
- a C25/30 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0{,}8 \cdot 1{,}4 \cdot (25+8) = 37{,}0$ N/mm^2;
- a C30/37 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0{,}8 \cdot 1{,}4 \cdot (30+8) = 42{,}6$ N/mm^2.

Ha a betont fiatal korában, amikor még kicsi a szilárdsága, megterhelik, akkor a kúszási alakváltozás a rugalmas alakváltozás 3-5-szörösét is kiteheti. Ilyen esetben a $\varphi(t, t_0)$ kúszási tényezőben szereplő, a beton megterhelésének napban kifejezett t_0 időpontját a cement szilárdulási ütemének figyelembevételével a CEB Bulletin 199:1990 és a CEB-FIP Model Code 1990 szerint a következő összefüggéssel kell kiszámítani:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left[\frac{9}{2 + \left(t_{0,T} / t_{1,T}\right)^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha} \geq 0{,}5\ nap \tag{5}$$

ahol:

$t_{0,T}$ az *Arrhenius*–féle t_T helyettesítő időtartam a megterhelés időpontjában, napban kifejezve

$t_{1,T}$ = 1 nap, amelyet a mértékegységre tekintettel szerepeltetnek az összefüggésben

α = -1 a lassan szilárduló (SL jelű) cement esetén; 0 normál (N jelű) vagy gyorsan (R jelű) szilárduló cement esetén; +1 a gyorsan szilárduló (RS jelű) nagyszilárdságú cement esetén

Az (5) szerinti összefüggést az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány a B.9 jel alatt a következő, egyszerűbb formában közli, és a cementek szilárdulását is némiképp módosítva értelmezi:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left[\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha} \geq 0{,}5\ nap \tag{6}$$

ahol:

$t_{0,T}$ az *Arrhenius*–féle t_T helyettesítő időtartam a megterhelés időpontjában, napban kifejezve

α = -1 a lassan szilárduló (S jelű) cement esetén; 0 normál módon szilárduló (N jelű) cement esetén; +1 a gyorsan szilárduló (R jelű) cement esetén

Egyes szabványokban az érési, szilárdulási modell segítségével nem csak a nyomószilárdság, hanem egyéb szilárdsági jellemzők időbeni változásának meghatározásával is foglalkoznak az *Arrhenius*-féle modell alapján.

Így például az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány

– 3.1.2 fejezetének (9) bekezdése szerint a *28 naposnál fiatalabb beton tengelyirányú húzószilárdsága* átlag értékének időbeni értéke $f_{ctm}(t)$ a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényező és a 28 napos beton tengelyirányú húzószilárdsága f_{ctm} átlag értékének függvényében:

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{ctm} = \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \cdot f_{ctm} \qquad [N/mm^2] \tag{7}$$

– 3.1.3 fejezetének (3) bekezdése alatt a *rugalmassági modulus* (E_{cm}) időbeni változásának számítására a következő összefüggés található:

$$E_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)^{0,3} \cdot E_{cm} = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} \qquad [N/mm^2] \tag{8}$$

ahol: E_{cm} a 28 napos korú beton rugalmassági modulusa

Mint már említettük, az ASTM C 1074-04 szabvány 8.7 fejezete a fiatal beton *hajlítószilárdságának* becslését teszi lehetővé a tárgyalt *Nurse-Saul*-féle és *Arrhenius*-féle helyettesítő időtartam meghatározásával.

ÖSSZEFOGLALÁS

A hőmérsékletnek a fiatal beton szilárdságára gyakorolt hatását legbiztonságosabban kísérlettel lehet megbecsülni. Ehhez meg kell határozni a szabványosan tárolt és utókezelt (MSZ EN 12390-2:2009) beton átlagos nyomószilárdságát minél több időpontban, de mindenképpen például 1 vagy 2 napos és 7 vagy 14, legfeljebb 28 napos korban, majd valamelyik számítási módszer (modell) segítségével, logaritmikus interpolálással ki kell számítani a tényleges betonhőmérséklethez tartozó helyettesítő időtartamot és a szilárdulási idő tényezőt, majd az adott időponthoz tartozó, hőmérsékletfüggő nyomószilárdságot. Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány a 28 naposnál fiatalabb beton szilárdulási tényezőjének összefüggését az *Arrhenius*-féle modell alapján adja meg. A szabványos *Arrhenius*-féle modell a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban az 5 °C alsó hőmérséklethez tartozó *Nurse-Saul*-féle függvénnyel jól közelíthető. Legtöbb kísérleti munkával jár, de épp ezért nagyobb biztonsággal becsülhető meg a fiatal beton nyomószilárdsága a *de Vree*-féle modellre épülő *CEMIJ*-féle számítási módszerrel.

HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK ÉS JELENTÉSEK

ASTM C 1074-04 „Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", 2004; A szabvány korábbi változata 1993-ban, illetve 1998-ban jelent meg „Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method" címmel

CEB Bulletin 199:1990 „Evaluation of the time dependent behaviour of concrete"

CEB-FIP Model Code 1990 Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information No. 203-205, Final Draft, Chapters 4-10, Lausanne 1991; First published by Thomas Telford Services Ltd., London, 1993.

EN 197-1:2000 „Cement. 1. rész: Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei". Módosítások: MSZ EN 197-1:2000/A1:2004 és MSZ EN 197-1:2000/A3:2007

ISO 1920-3:2004 „Testing of concrete. Part 3: Making and curing test specimens"

ISO 2736-2:1986 „Concrete tests. Test specimens. Part 2: Making and curing of test specimens for strength tests". Visszavonva, felváltotta az ISO 1920-3:2004 szabvány. (Honosított változata: MSZ ISO 2736-2:1991 „Betonvizsgálati próbatestek. Próbatestek készítése és kezelése szilárdságvizsgálati célra". Visszavonva: 2001. november 1.)

MSZ EN 12390-2:2009 „A megszilárdult beton vizsgálata. 2. rész: Szilárdságvizsgálati próbatestek készítése és tárolása"

MSZ EN 1992-1-1:2010 Eurocode 2: „Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok"

HIVATKOZÁSOK

Arrhenius, S.:„On the Reaction Velocity of the Inversion of Cane Sugar by Acids" *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, No. 4, 1889, pp. 226-232 (as translated and published in Margaret H. Back and Keith J. Laidler, 1967, „Selected Readings in Chemical Kinetics" *Pergamon*, Oxford, 1967).

Atrushi, D. S.:„Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling", Doctoral Thesis. Trondheim, Norway, 2003

Kanstad, T. – Hammer, T. A. – Bjøntegaard, Ø. – Sellevold, E. J.: „Mechanical properties of young concrete: Evaluation of test methods for tensile strength and modulus of elasticity. Determination of model parameters", Nor-Ipacs report STF22. *Norwegian Inst. of Techn.*, Trondheim, 1999.

Rostasy, F. S. – Krauß, M. – Budelmann, H.: „Planungswerkzeug zur Kontrolle der frühen Rißbildung in massigen Betonbauteilen", *Bautechnik*, 79, 2002, H. 7. – H. 12.

Röhling, S.: „Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme", *Verlag Bau+Technik GmbH*, Düsseldorf, 2009

Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure", *Magazine of Concrete Research*, 1951, No. 6., pp. 127-140.

Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons", *beton*, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

Jelmagyarázat:

{◄} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik korábbi számában található.

{►} A szócikk a BETON szakmai havilap valamelyik következő számában található.

A cikk megjelent a	BETON szakmai havilap	2011. június havi számának 16-19. oldalán

A FIATAL BETON SZILÁRDULÁSI FOLYAMATÁNAK MODELLJEI SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS
1. RÉSZ: A NURSE-SAUL- ÉS A PAPADAKIS-BRESSON-FÉLE MODELL

Vasbetonépítés, 2011. 2. szám. pp. 49-53.

Dr. Kausay Tibor

A betonkészítés során az utókezelési mód, a kizsaluzhatósági, a terhelhetőségi, esetleg a feszítőerő ráengedési idő, stb. meghatározása szempontjából fontos lehet a fiatal beton szilárdsági tulajdonságai, – például a korai nyomószilárdság, húzószilárdság, rugalmassági modulus – kialakulásának az ismerete. A fiatal beton szilárdulását számos tényező mellett jelentősen befolyásolja a hőmérséklet, ezért a szilárdulási folyamatot az idő és a hőmérséklet függvényében szokták tanulmányozni. Az utóbbi hatvan évben a tapasztalatokat több kutató szilárdulási (érési) modellel írta le, amelyek közül dolgozatunkban a legalapvetőbbeket tekintjük át.

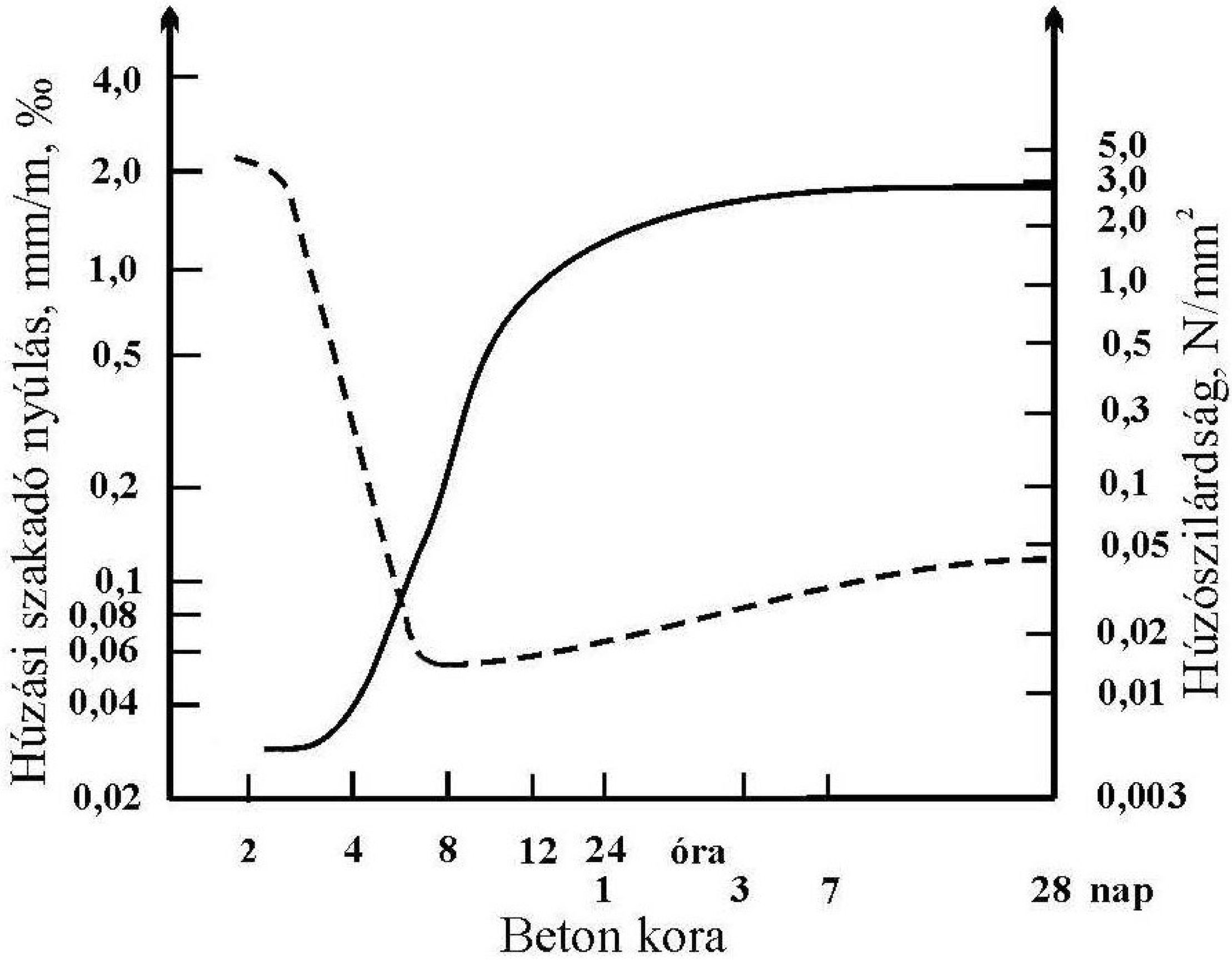
Kulcsszavak: fiatal beton, szilárdulási folyamat, Nurse-Saul-féle modell, Papadakis-Bresson-féle modell, De Vree-féle modell, CEMIJ-féle módszer, Arrhenius-féle modell, Eurocode 2

1. BEVEZETÉS

A beton, illetve az előregyártott beton elem korai repedés érzékenysége, kizsaluzhatósága, előfeszíthetősége, szállíthatósága stb. a *fiatal beton* szilárdulási (érési) tulajdonságaitól függ.

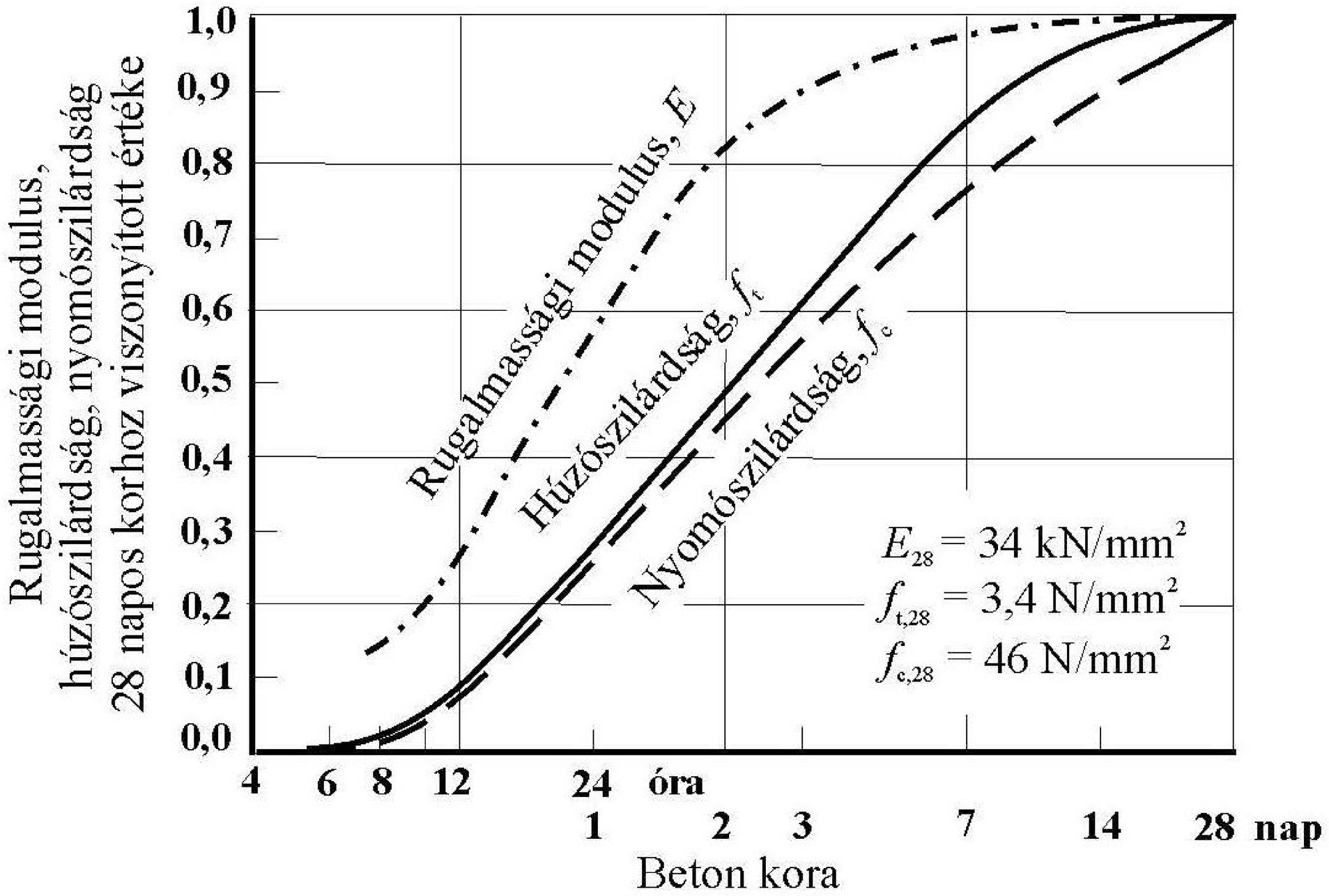
A fiatal beton szilárdulási folyamatát sok tényező, például a cement fajtája és mennyisége, a víz-cement tényező, a kiegészítő anyag és az adalékszer hatása, a tömörítés és az utókezelés módja és időtartama, a beton hidratációs (belső) hőmérséklete és a környezet (külső) hőmérséklete, a szél hatása, a beton kora, voltaképpen a cementkő szilárdulása (hidratációja) és porozitása befolyásolja. Dolgozatunkban e tényezők közül elsősorban az idő és a hőmérséklet hatását tárgyaljuk.

A beton kötési-szilárdulási állapota szerint meg szokták különböztetni a friss betont, azon belül a zöld betont és a fiatal betont, valamint a szilárd betont. *Zöld betonnak* a beépített és betömörített, de még kötés előtt lévő friss betont nevezik, amelynek „zöld szilárdsága” (mintegy 0,1-0,3 N/mm^2, legfeljebb 0,5 N/mm^2) nem a hidratáció, hanem a cementpép folyáshatárának és adhéziós erejének köszönhető. A zöld beton a hidratáció, a kötés és szilárdulás előrehaladtával éles határ nélkül, a víz hozzáadásától számított mintegy 6-12 óra között a képlékeny állapotból átmegy a *fiatal beton* viszkoelasztikus állapotába, amelyet nagy ernyedés (relaxáció) jellemez. A még közel képlékeny állapotú fiatal beton saját és *gátolt alakváltozásból* keletkező feszültségeinek nagy része még az első napon leépül, miközben azok az alakváltozások, amelyek a beton 48 órás kora után lépnek fel, csak nagyon lassan mérséklődő feszültségek forrásai. *A fiatal beton megrepedése szempontjából a szakadó nyúlás mértéke a meghatározó.* Ez eleinte igen nagy, de a beton dermedése után, a *szilárdulás* ütemétől függően, általában 6-16 órán belül minimumra esik (értéke mintegy 0,04-0,08 mm/m), majd egy hét alatt duplájára nő. Ahol a húzási szakadó nyúlás görbéjének minimuma, ott a beton – az idő függvényében ábrázolt – húzószilárdsági görbéjének inflexiós pontja van (*1. ábra*). Ettől az időponttól (vagy a *Vicat*-féle kötés kezdetétől) általában 14 napos korig (vagy rövidebb ideig, például 36 vagy 72 órás korig) nevezik a betont fiatal betonnak. A fiatal beton már megkötött és nem munkálható meg, átmenetet képez a friss és a szilárd beton között.



1. ábra: A zöld és a fiatal beton húzási tulajdonságai. Forrás: vdz Zement-Taschenbuch (2008), *Zilch – Diederichs – Katzenbach* (2001), *Schießl* (2003), *Weigler – Karl* (1974)

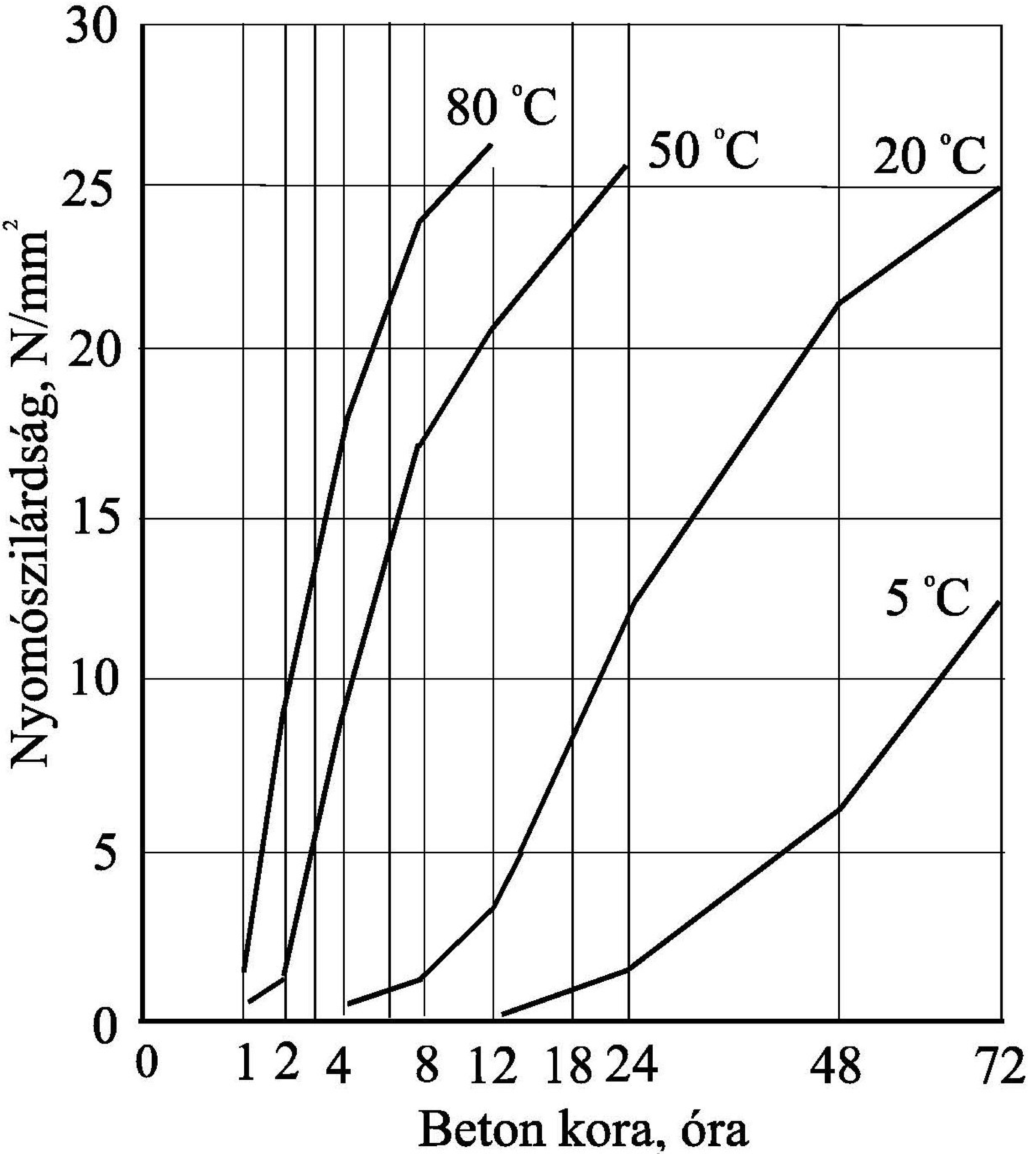
A beton szilárdulása időben lejátszódó folyamat (*2. ábra*). A *20 °C hőmérsékleten szilárduló fiatal beton rugalmassági modulusa* már 24 órás korban elérheti a 28 napos korú beton rugalmassági modulusának mintegy 70 %-át, 2 napos korban pedig akár a 90 %-át. A rugalmassági modulus növekedésével az ernyedés – azaz az alakváltozási képesség, amelyben az ébredő feszültségek elenyésznek – egyre kisebb lesz. A beton *húzószilárdságának* fejlődése erősebben függ a cement fajtájától, 2 napos korban a 28 napos beton húzószilárdságának 50-65 %-át, 7 napos korban 80-85 %-át teheti ki. A nagyon lassan szilárduló cementek esetén 1-2 napos korban a még nagyon kis húzószilárdság és a már nagyon nagy rugalmassági modulus következtében nagyon kicsi a *nyúlási képesség*, de később eléri a végértéket (0,1 mm/m = 0,1 ‰). A beton *nyomószilárdsága* is jelentős mértékben függ a cement fajtájától. A nyomószilárdság a lassan, illetve a gyorsan szilárduló cementek esetén
3 napos korban a 28 napos beton nyomószilárdságának 35, illetve 55 %-át, 7 napos korban 60, illetve 75 %-át érheti el, mint az MSZ EN 206-1:2002 szabvány 12. táblázatából is kitűnik. (*Iványi,* 2006)



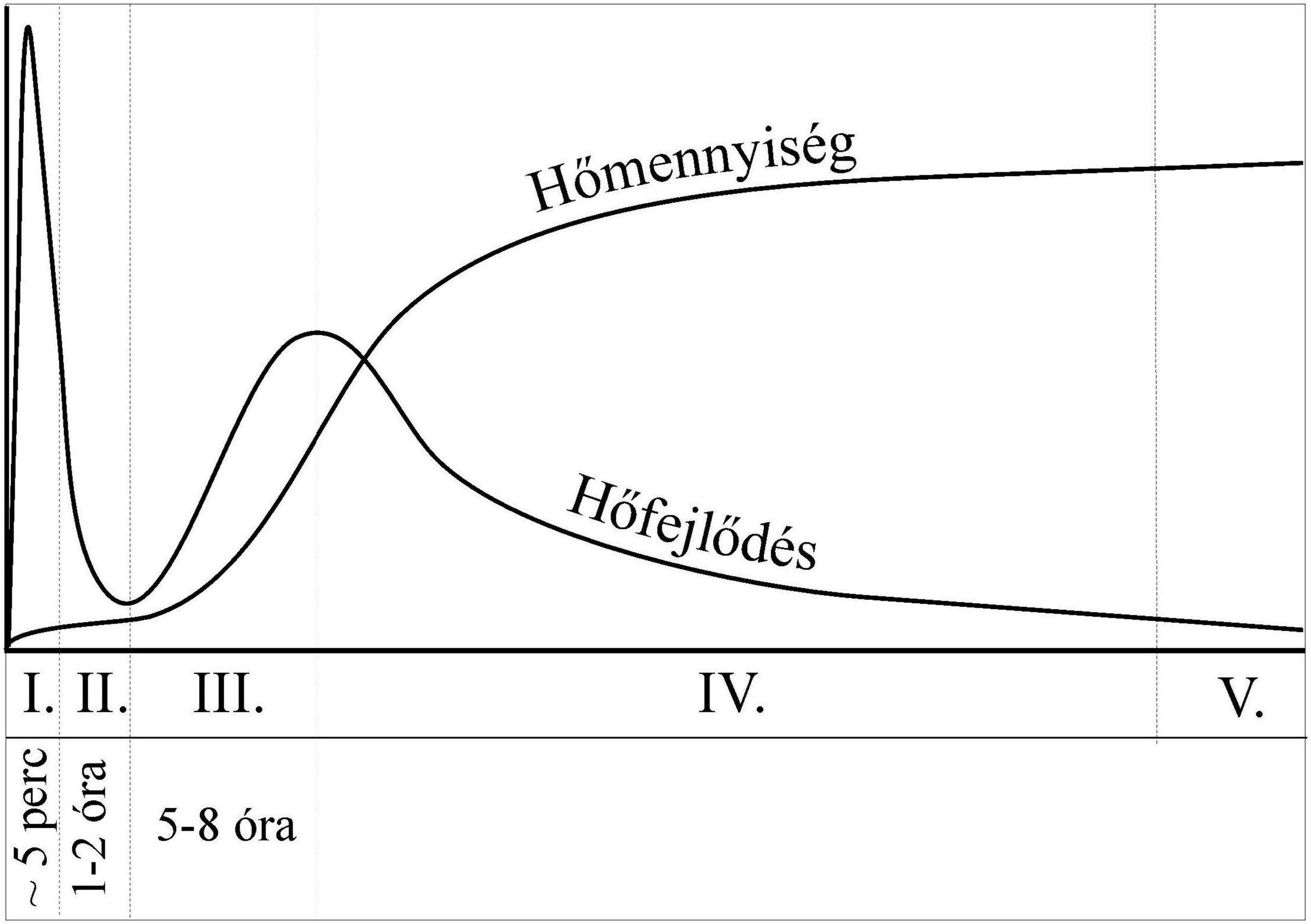
2. ábra: Beton 28 napos korhoz viszonyított rugalmassági modulusának, húzószilárdságának, nyomószilárdságának növekedése az idő függvényében. Forrás: *Weigler – Karl* (1974), *Iványi* (2006), *Springenschmid* (2007)

Az időfüggő alakváltozási tulajdonságok, mint a *kúszás és az ernyedés*, jelentős mértékben függenek a fiatal beton korától és az igénybevétel sebességétől, amely utóbbi a fiatal beton esetén lassúnak tekinthető. *A fiatal beton ernyedési-kúszási viszonyainak* meghatározásához fontos a *gátolt alakváltozásból eredő feszültségek* leépülésének megismerése. Az ernyedési tényező ($\chi_{t,to}$, Relaxationsbeiwert vagy Alterungsbeiwert), azaz a maradó feszültség (Restspannung) és a gátolt alakváltozásból számított feszültség (rechnerische Zwangspannung) viszonyszáma, amely szilárd beton esetén általában 0,5-1,0 közötti szám. A kísérletek szerint értéke, a terhelés hirtelen felhordását követő 4-5 nap múlva (t), a beton korától – a megterhelés idején – (t_0) függően 0,65-0,70. Ha a friss betont 1 napos korában, hirtelen terhelik meg, vagy a terhet csak 2-4 napos korában lassan, több nap alatt hordják fel, akkor mind a két esetben 0,5 értéknél kisebb az ernyedési tényező ($\chi < 0,5$). Egyébként a szilárdulás előrehaladtával a beton ernyedési képessége erősen lecsökken, ezért a kényszerhatásokat az ernyedési tényező $\chi = 0,8$ értével szokás figyelembe venni. (*Iványi*, 2006)

A beton kis hőmérsékleten lassabban, nagy hőmérsékleten gyorsabban szilárdul (*3. ábra*). A szilárdulást befolyásoló hőmérsékletnek két összetevője van, az egyik a beton hidratációs (belső) hőmérséklete (*4. ábra*), a másik a beton hőmérsékletére hatást gyakorló, a rövidhullámú (pl. napsugárzás) és a hosszúhullámú (pl. tárgyakról visszaverődő) hősugárzásból eredő környezeti (külső) hőmérséklet, amely a hidratációs hőfejlődés csillapodása után, lényegében a beton 48 órás korát követően, meghatározóvá válik. A környezeti hőmérsékletnek ezt a szilárdulást és alakváltozást befolyásoló hatását veszik figyelembe az érési, szilárdulási modellek, többnyire úgy, hogy a környezeti hőmérséklet hatását a 20 vagy 25 °C hőmérsékleten érlelt beton szilárdsági tulajdonságaira – mint összevetési alapra – vonatkoztatják. Dolgozatunkban a hőmérséklet alatt a beton környezeti hőmérsékletét értjük.



3. ábra: A hőmérséklet hatása a fiatal beton nyomószilárdságára, 350 kg/m^3 CEM I 32,5 jelű cement-tartalom és 0,5 víz-cement tényező esetén, *Wierig* (1970) után. Forrás: *Springenschmid* (2007).



4. ábra: Hidratációs hőfejlődés folyamata
I. fázis: Lényegében a szabad kalciumoxid és a trikalcium-aluminát (felit) hidratációjának, valamint az ettringit, illetve a monoszulfát képződésnek a fázisa.
II. fázis: Az ettringit és a monoszulfát összefüggő burokként vonja be az aluminát (felit) és az aluminátferrit (celit) fázisokat, ezzel késleltetve ezek hidratációját, a hőfejlődés átmenetileg csökken. Alvó vagy nyugalmi periódusnak is nevezik.
III. fázis: A fázisokat bevonó burok átkristályosodás, ozmózis-nyomás folytán áthatolhatóvá válik, a cement szemek reakcióképessége helyreáll, a hőfejlődés újra fokozódik és eléri maximumát.
IV. fázis: A hőfejlődés csökken és nullához tart. Kishőfejlesztésű cementek esetén ebben a fázisban csekély utómelegedés és harmadik, kis hőfejlődés csúcs lép fel.
V. fázis: A hidratáció gyakorlatilag befejeződik.
Forrás: *Madaleno* (2002)

A sok befolyásoló tényező ellenére kidolgoztak olyan viszonylag egyszerű számítási módszereket (modelleket), amelyekkel a fiatal beton szilárdulási tulajdonságai (például a korai nyomószilárdság, húzószilárdság, rugalmassági modulus) *az idő és a hőmérséklet függvényében meghatározhatók*, és amelyek a beton szilárdulási folyamatát, érési állapotát leíró vagy becslő módszereknek (németül: Konzept der Betonreife, Konzept gewichteter Reife des Betons, Reifemodell; angolul: maturity method; franciául: méthode d'échéance) nevezhetők (*Zement-Taschenbuch*, 2008). Az irodalomban számos modell található (*Madaleno*, 2002), dolgozatunkban ezek közül a legalapvetőbbeket tekintjük át.

2. NURSE-SAUL-FÉLE BETONSZILÁRDULÁSI MODELL

A *Saul*-féle modell megfogalmazásának előzménye, hogy *Nurse* 1949-ben a beton szilárdulásának becslésére a hidratációs hőmérsékletből levezetett lineáris összefüggés alkalmazását javasolta. A *Nurse*-féle elképzelést *Saul* 1951-ben fejlesztette tovább, ezért *Saul* módszerét sokszor *Nurse-Saul*-féle modellnek nevezik.

A *Saul*-féle elmélet szerint a gőzölt beton korai nyomószilárdsága kizárólag az *R érési idő-fok* függvénye, és azt a hőmérséklet és a cement fajtája nem befolyásolja. A gőzölt beton *R* érési fok-idő száma nem más, mint a *gőzölési idő-hőmérséklet diagram alatti terület nagysága*, amelyet *Saul* a következő érési formulával (németül: Reifeformel von *Saul*) fejez ki:

$$R = \Sigma(T_i + 10)\cdot\Delta t_i \quad [\text{óra}\cdot^{o}\text{C vagy nap}\cdot^{o}\text{C}] \qquad (1)$$

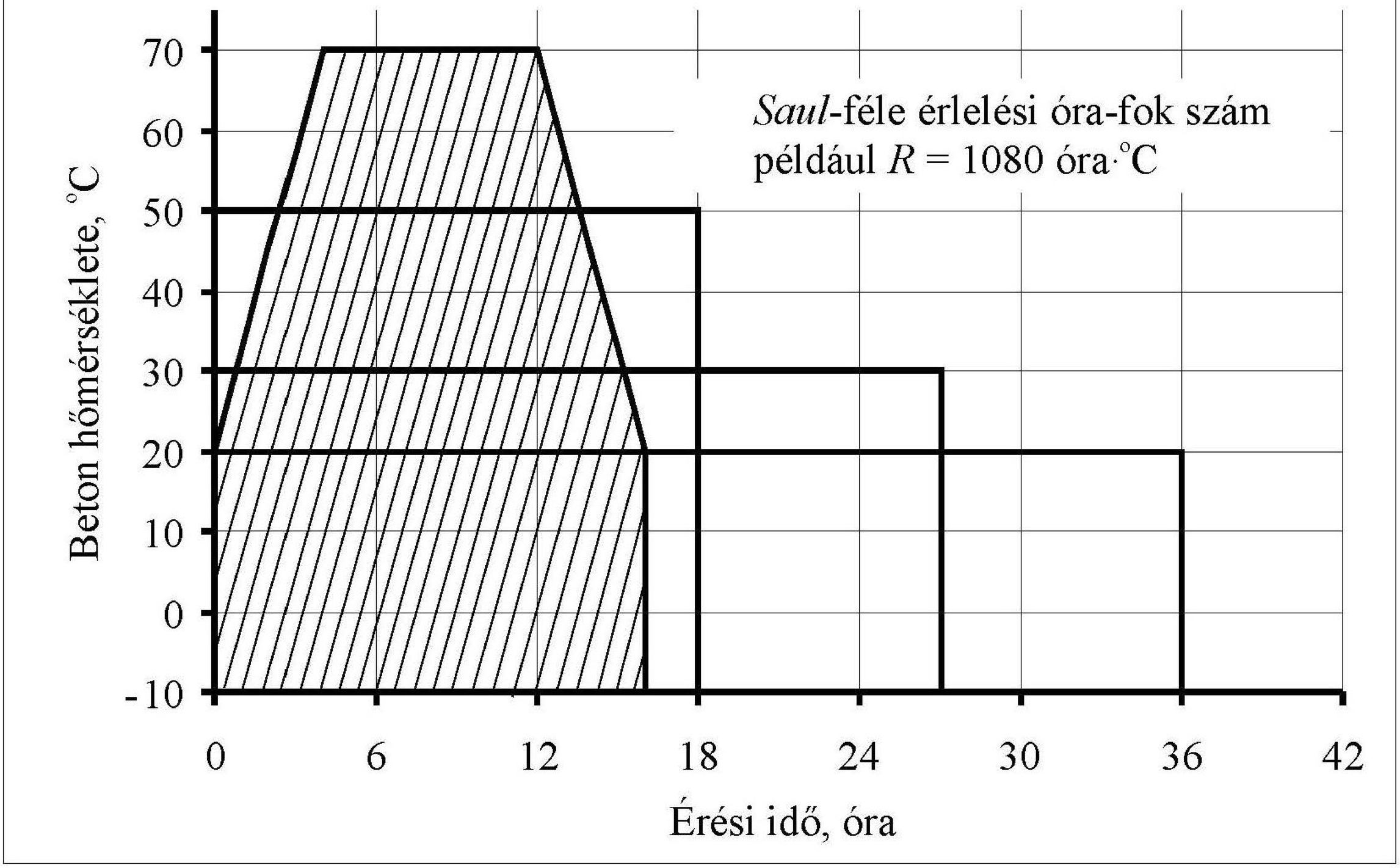
ahol:

- R a beton érését (hidratáció előrehaladtát) kifejező idő-fok (óra-fok vagy nap-fok) szám (németül: Reife), mint a gőzölt beton gőzölési idő-hőmérséklet diagramja alatti terület nagysága
- T_i az adott szilárdulási időtartam (intervallum) alatt változatlan betonhőmérséklet vagy átlag betonhőmérséklet, °C-ban kifejezve
- Δt_i a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan vagy átlagával jellemezhető (T_i), napban vagy órában kifejezve
- i a szilárdulási időtartam (intervallum) sorszáma, $i = 1, 2, 3 \ldots n$

A *Saul*-féle formulából kitűnik, hogy T_i = -10 °C esetén az idő-fok szám R_i = 0,0 °C·óra, tehát *Saul* feltételezi, hogy a *beton hidratációja* a $T_i = T_0$ = -10 °C alsó hőmérsékleten megáll. Tapasztalatok szerint (+3 és -10) °C hőmérséklet között a beton szilárdulása rendkívül lelassul, és -2 °C hőmérséklet alatt a beton csak akkor szilárdul, ha már olyan szilárd, hogy a fagy nem károsítja (*Springenschmid,* 2007).

Saul tételéből az következnék, hogy az azonos összetételű, különböző hőmérsékleten érlelt betonoknak azonos a szilárdsága, ha az *R* érési idő-fok számuk egyforma. Például a

- 36 órán át konstans 20 °C hőmérsékleten szilárdult beton [$R = (20 + 10)\cdot 36 = 1080$ óra·°C] nyomószilárdsága ugyan akkora, mint az ugyan olyan összetételű, de
- 27 órán át konstans 30 °C hőmérsékleten érlelt betoné [$R = (30 + 10)\cdot 27 = 1080$ óra·°C], vagy a
- 18 órán át konstans 50 °C hőmérsékleten érlelt betoné [$R = (50 + 10)\cdot 18 = 1080$ óra·°C], vagy a
- 4 óra alatt 20 °C-ról 70 °C hőmérsékletre felfűtött, 8 órán át konstans 70 °C hőmérsékleten érlelt és 4 óra alatt 70 °C-ról 20 °C hőmérsékletre lehűtött betoné [$R = (20 + 50/2 + 10)\cdot 4 + (70 + 10)\cdot 8 + (20 + 50/2 + 10)\cdot 4 = 1080$ óra·°C], mert az érési óra-fok számuk egyforma (*5. ábra*).



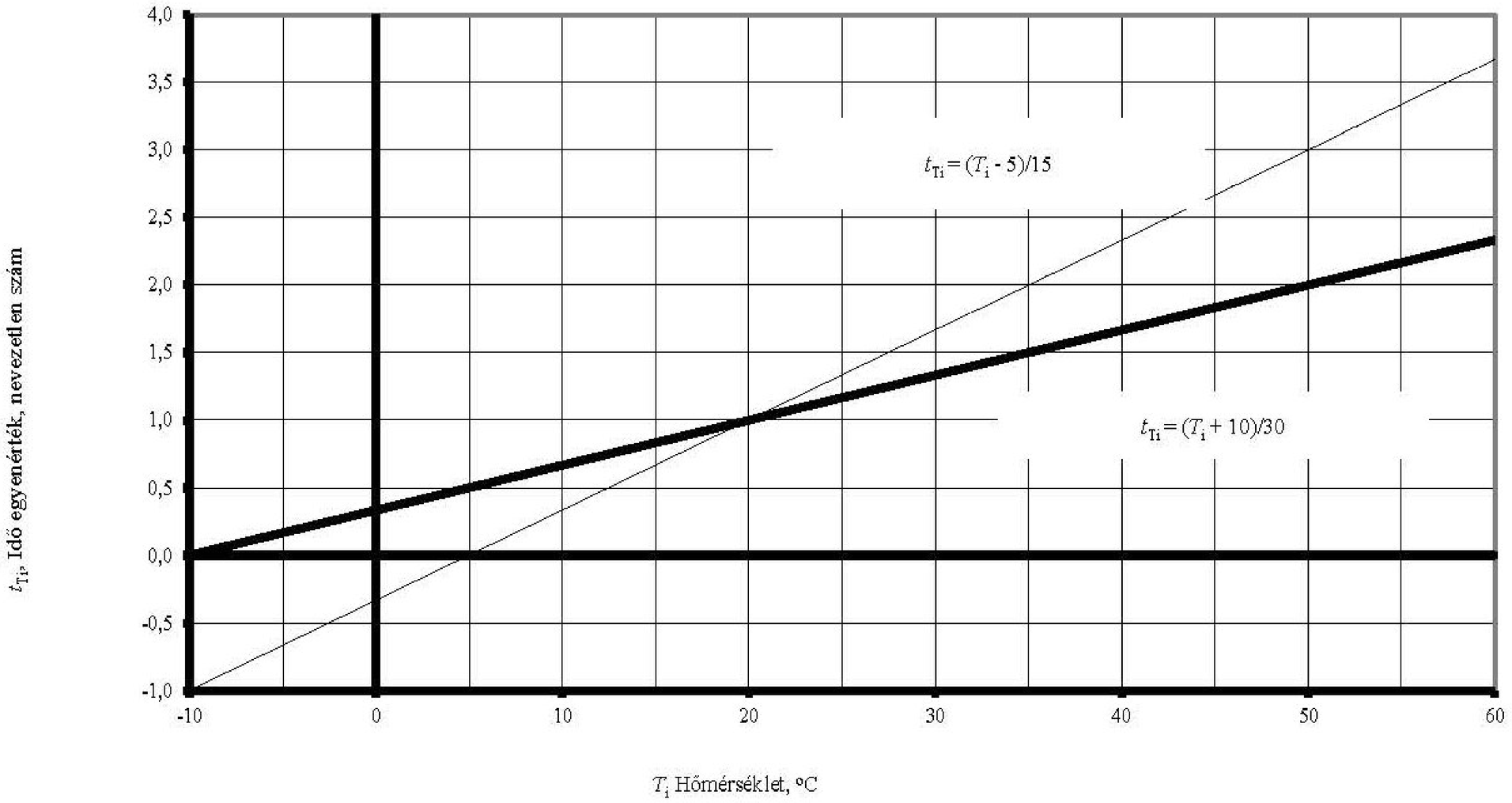
5. ábra: Azonos érési (érlelési) óra-fok számú betonok *Saul*-féle hőmérséklet-idő diagramja. A hőmérséklet-idő diagram alatti terület az óra-fok számot, azaz a hőmennyiséget fejezi ki.

Ha Δt_i = 1 napon át a hőmérséklet $T_{20°C}$ = 20 °C, akkor a 20 °C hőmérséklethez tartozó idő-fok szám $R_{20°C} = (20 + 10)\cdot 1 = 30$ nap·°C. Képezzük egy adott T_i betonhőmérséklethez tartozó R_{Ti} idő-fok szám és a $T_{20°C}$ = 20 °C betonhőmérséklethez tartozó $R_{20°C}$ idő-fok szám hányadosát, ha a szilárdulási időtartam Δt_i = 1 nap:

$$t_{T_i} = \frac{R_{T_i}}{R_{20°C}} = \frac{T_i + 10}{30} \qquad [nevezetlen\ \ szám] \qquad (2)$$

A (2) szerinti hányados azt fejezi ki, hogy egységnyi időtartamot, például 1 napot tekintve, az adott T_i hőmérséklethez tartozó R_{Ti} nap-fok szám hányszorosa a $T_{20°C}$ = 20 °C hőmérséklethez tartozó $R_{20°C}$ = 30 nap-fok számnak, más szóval, hogy a szóban forgó T_i hőmérsékletű, *i*-edik nap a kémiai reakció (például a beton szilárdulása) szempontjából hány 20 °C hőmérsékletű nappal ér fel. Ezt a t_{Ti} hányadost „érési képlet”-nek (németül: Reifeformel) nevezik, amelynél talán kifejezőbb az *idő-egyenérték* megnevezés.

A *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés képe a T_i-t_{Ti} koordináta rendszerben ábrázolva egy $y = a\cdot x + b$ alakú egyenes, amelynek paraméterei: a = 1/30 és b = 10/30. A 20 °C hőmérsékletű nap idő-egyenértéke $t_{Ti} = t_{20°C} = 1{,}0$, a $T_i = T_0$ = -10 °C alsó hőmérsékletű nap idő-egyenértéke $t_{Ti} = t_{-10°C} = 0{,}0$ (*6. ábra*). A következőkben látni fogjuk, hogy a $T_i = T_0$ = 5 °C alsó hőmérséklettel jellemzett *Saul*-féle függvényt a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban akár ma is használhatjuk, ezért a *6. ábrán* ennek egyenesét is feltüntettük.



6. ábra: A *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés, ha $T_i = T_0 = -10$ °C (és ha $T_i = T_0 = +5$ °C)

A *i*-edik tényleges szilárdulási időtartamot (Δt_i) az idő-egyenértékkel (t_{Ti}) megszorozva az *i-edik hatékony időtartamot* (németül: *wirksames Betonalter*) kapjuk:

$$\Delta t_{T_i} = t_{T_i} \cdot \Delta t_i = \frac{T_i + 10}{30} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{3}$$

Ha a hatékony időtartamokat a kémiai reakció kezdetétől (például a beton elkészítésétől) a vizsgált időpontig, tehát i = 1-től n-ig összegezzük, akkor megkapjuk, hogy a vizsgált időpontig eltelt tényleges időtartam a kémiai reakció (a beton szilárdulása) szempontjából mekkora t_T **helyettesítő időtartamnak** (németül: *tatsächliches Betonalter*) felel meg, amelyet a *Saul*-féle összefüggés a következőképpen fejez ki:

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_{T_i} = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i + 10}{30} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{4}$$

Az *egykori DIN 4227-1:1988 szabványban* (helyette ma a *DIN 1045-1:2008* szabvány van érvényben) a *kúszási tényező* (a szabvány 8.3. fejezete) és a *zsugorodás* (a szabvány 8.4. fejezete) $t < \infty$ időponthoz tartozó értékét a *Saul*-féle összefüggésből származtatott helyettesítő időtartam (t_T) figyelembevételével számították ki. A DIN 4227-1:1988 szabvány 8.6. fejezetében a fentiektől eltérően a helyettesítő időtartam (t_T) összefüggését nevezték „wirksames Betonalter"-nek (*Beton-Kalender* 1991, Teil II, pp. 263.).

A *Bunke* szerkesztésében megjelent *DAfStb Heft 422.* kiadvány (1991) 4.2.2 fejezetében a t_T helyettesítő időtartamot a vizsgálati idő ($\Sigma\Delta t_i$) százalékban fejezték ki (németül relative Reife, jele *rel R*):

$$\text{rel } t_T{}^{\%} = \frac{\sum (T_i + 10) \cdot \Delta t_i}{30 \cdot \sum \Delta t_i} \cdot 100 \quad [nevezetlen\ szám] \tag{5}$$

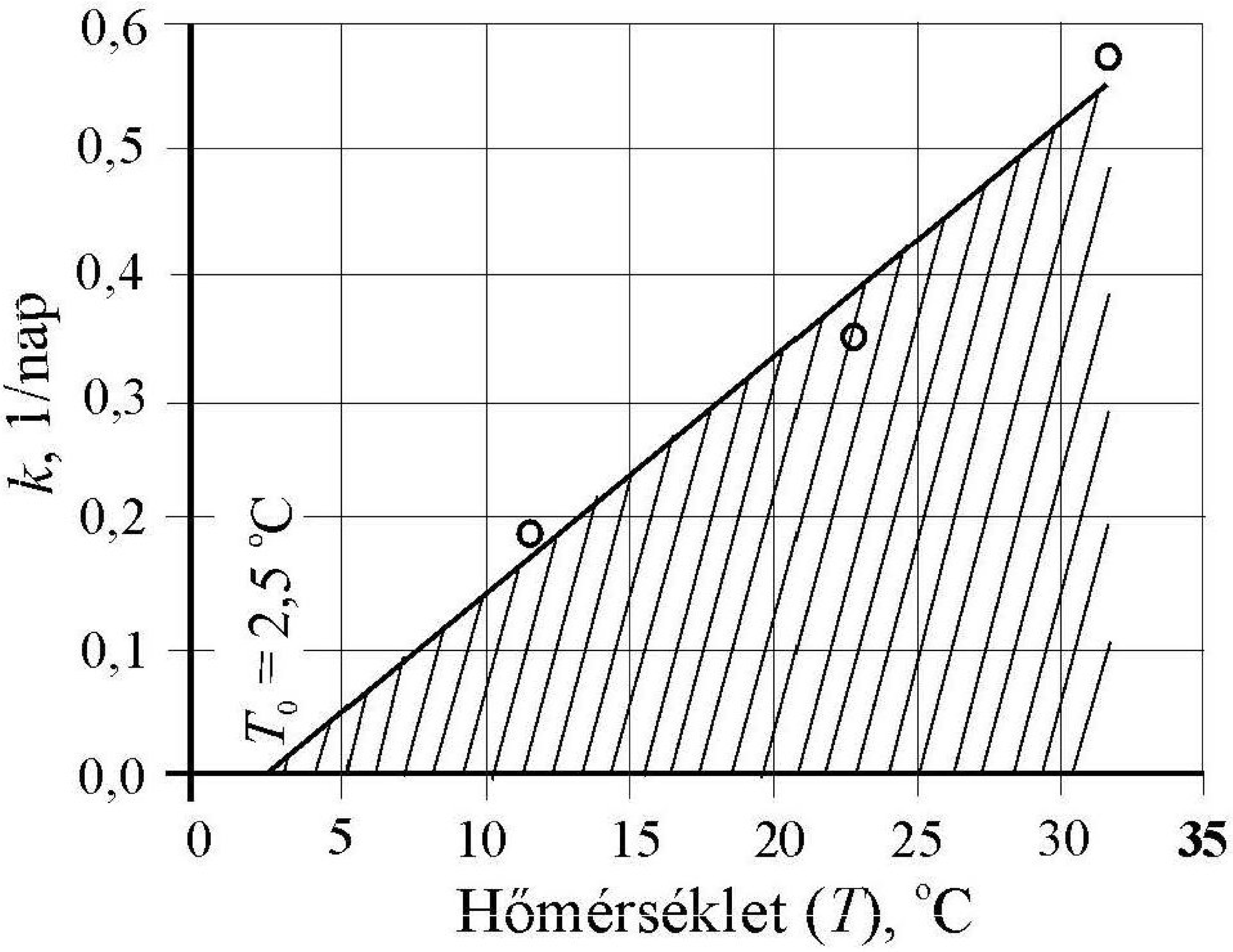
ahol:

T_i a beton napi átlaghőmérséklete, °C-ban kifejezve
Δt_i a napok száma, amelyeken a beton napi átlaghőmérséklete T_i

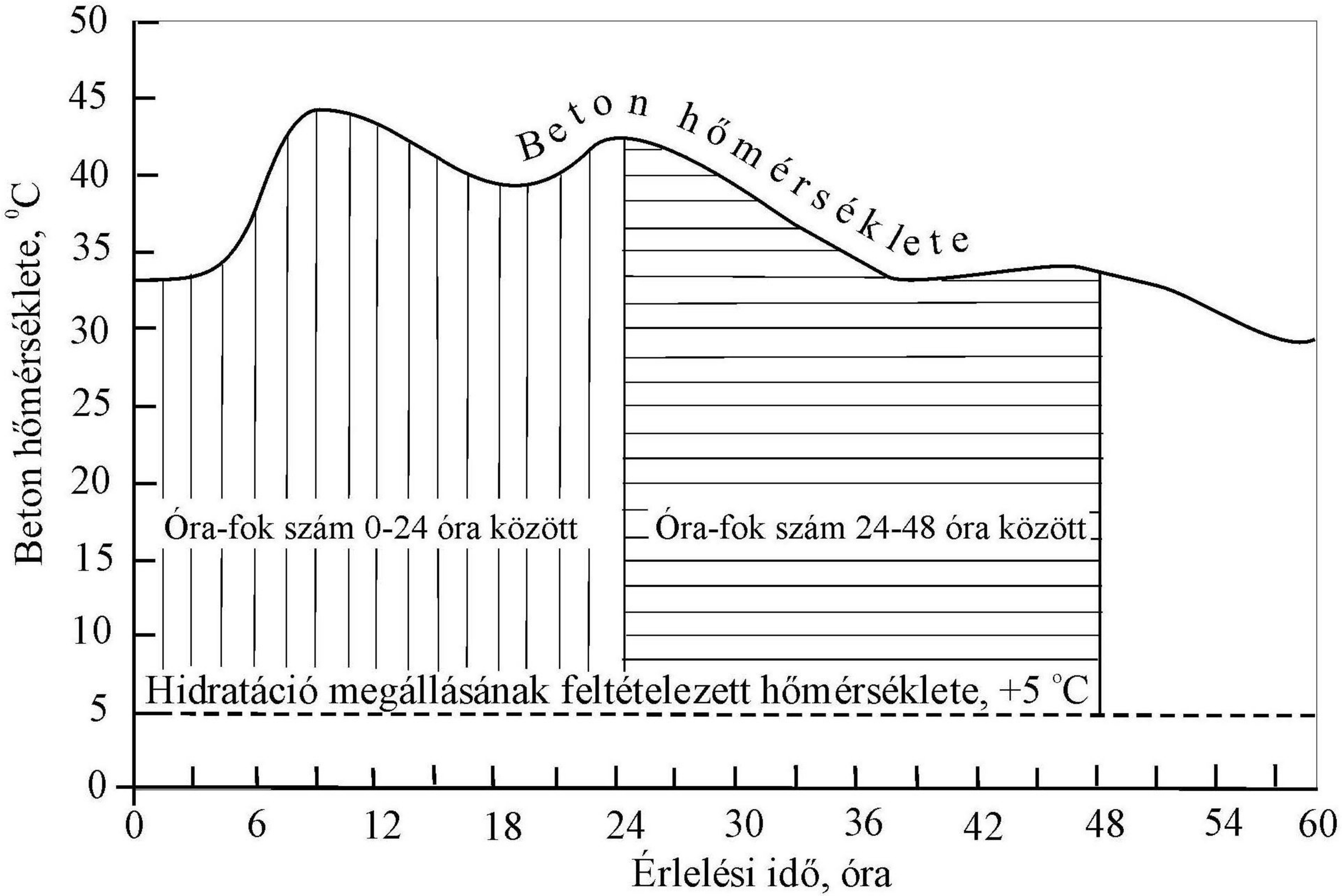
A *Nurse-Saul*-féle elmélet hiányosságai ellenére sem veszítette el időszerűségét, így azt például a *DAfStb Heft 555.* előírás-magyarázat (*Iványi*, 2006) a vízzáró beton építmények irányelvével kapcsolatban a *gátolt alakváltozás* (németül: Zwang) szempontjából tárgyalja.

Az *ASTM (American Society for Testing and Materials)* Amerikai Anyagvizsgáló Társaság 1987-ben adta ki először az ASTM C 1074-87 szabványt, amellyel a beton érési, szilárdulási állapotának becslését ipari körülmények között is szabályozott módon lehetővé tette (*Report IPRF*, 2006). Az ASTM C 1074-87 szabványban és a ma érvényes változatában (ASTM C 1074-04) két módszert írnak le, ezek egyike a *Nurse-Saul*-féle módszer néven tárgyalt *Saul*-féle, másik a dolgozatunk harmadik részében ismertetésre kerülő *Arrhenius*-féle módszer.

Az ASTM C 1074-04 szabványban és az újabb amerikai irodalomban az eredeti *Saul*- és a később bemutatandó *de Vree*-féle felfogástól (T_0 = -10 °C) eltérő T_0 hőmérsékleteket jelölnek meg a *Saul*-féle óra-fok szám diagram alatti terület alsó határvonalaként (angolul: *datum temperature*), feltételezve, hogy ezen a hőmérsékleten már nincs hidratáció. Ennek megfelelően az ASTM C 1074-04 szabvány 6.2 fejezete a *Nurse-Saul*-féle összefüggést a T_0 értékének megadása nélkül, az (1) szerintitől kissé eltérő $R = \Sigma(T_i + T_0)\cdot\Delta t_i$ alakban mutatja be. A T_0 hőmérséklet jelentőségét a szabvány A1.2 melléklete (Annex A1.2) és X1.2 függeléke (Appendix X1.2) tárgyalja. Az ASTM C 1074-04 szabvány az A1.2 mellékletben a T_0 = 2,5 °C alsó hőmérsékletre közöl diagramot (*7. ábra*), amerikai irodalmi példaként pedig a T_0 = 5 °C alsó hőmérséklet alkalmazására mutatjuk be a *8. ábrát* (*Report IPRF*, 2006).

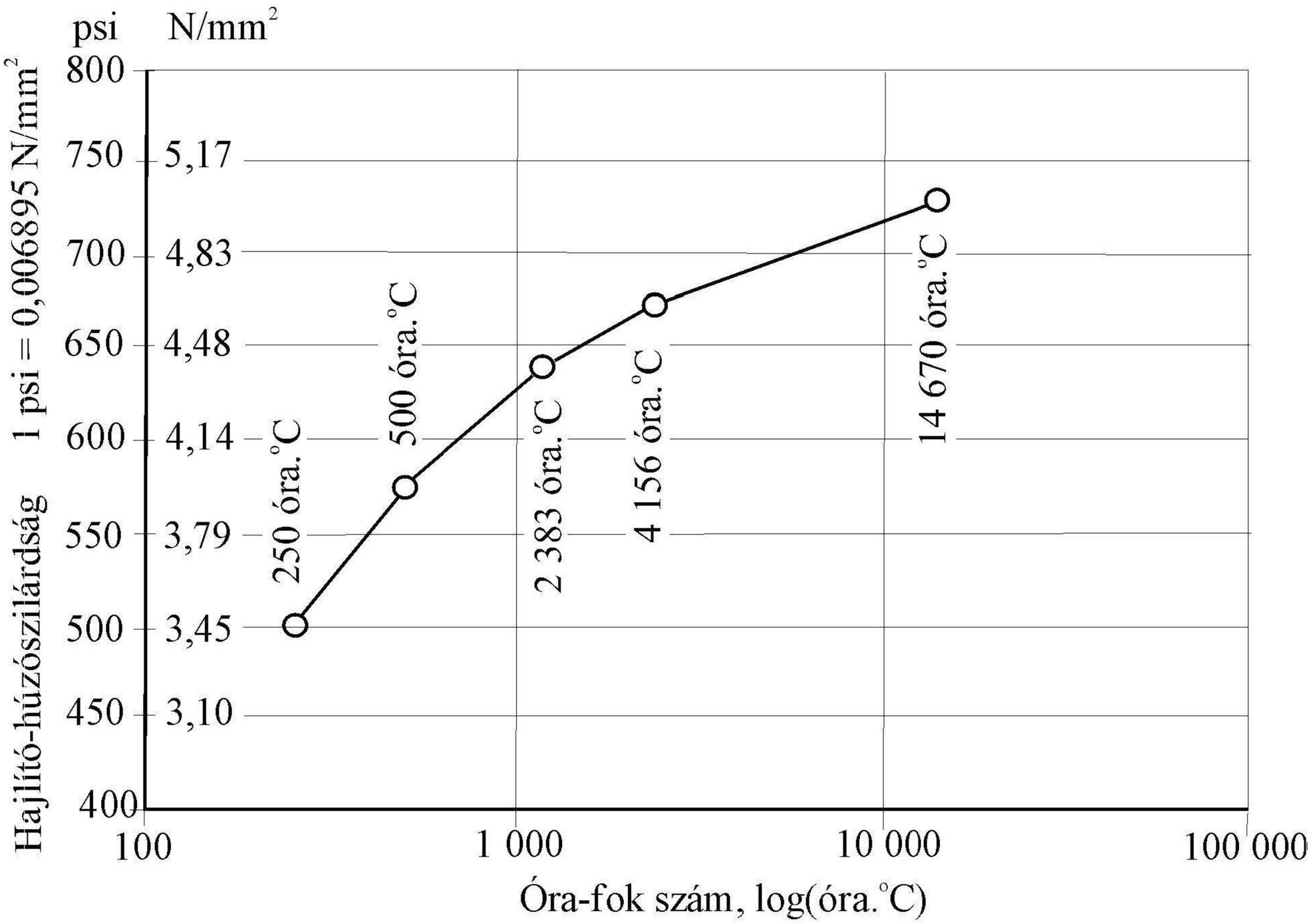


7. ábra: A *Saul*-féle óra-fok szám diagram alatti terület értelmezése az ASTM C 1074-04 szabvány szerint, annak feltételezésével, hogy T_0 = 2,5 °C hőmérséklet alatt nincs hidratáció.



8. ábra: Irodalmi példa a *Saul*-féle óra-fok szám diagram alatti terület értelmezésére, annak feltételezésével, hogy $T_0 = 5$ °C hőmérséklet alatt nincs hidratáció. Forrás: *Report IPRF*, 2006.

Az *ASTM C 1074-04* szabvány az eredetihez (ASTM C 1074-87) képest bizonyos változtatásokkal van érvényben, például a szilárdulási folyamat vizsgálatát a nyomószilárdságon kívül 2004-ben – az új 8.7 szakasszal –, a hajlító-húzószilárdságra is kiterjesztették (*9. ábra*).



9. ábra: Összefüggés a *Saul*-féle óra-fok szám és a hajlítószilárdság között. Forrás: *Report IPRF*, 2006

3. PAPADAKIS-BRESSON-FÉLE BETONSZILÁRDULÁSI MODELL

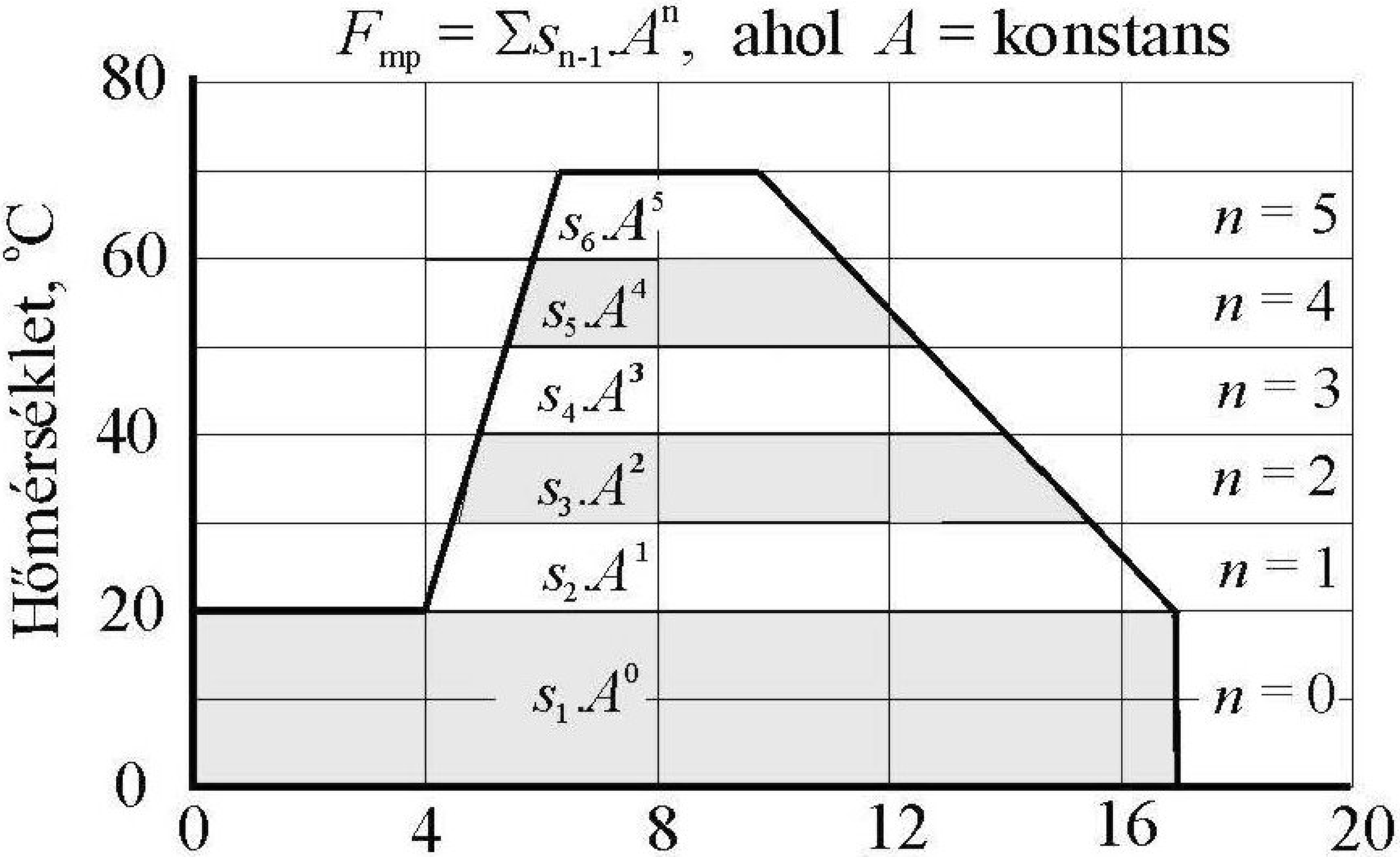
A *Saul*-féle tétel a beton szilárdulási hőmérséklete és nyomószilárdsága közötti összefüggést nagyon leegyszerűsíti. Nem veszi figyelembe, hogy a beton érését kifejező idő-fok szám nagyobb hőmérsékleten hatványozottan növekszik, vagy, hogy a különböző cementféleségeknek különböző hatása van az érési idő-fok számra, pedig például a tiszta portlandcement (CEM I) nyomószilárdságának növekedése nagyobb hőmérsékleten lassabb, mint a kohósalak és egyéb tartalmú portlandcementé (CEM II) vagy a kohósalakcementé (CEM III), és kisebb hőmérsékleten épp fordítva, gyorsabb.

A francia *CERIS* kutatóintézetben (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, Betonipari Tanulmányok és Kutatások Központja, Franciaország, Épernon) *Papadakis* és *Bresson* 1973-ban alakította ki betonérés (szilárdság) becslési módszerét, amellyel – bevezetve a cement hőérzékenységét figyelembe vevő tényezőt – a *Saul*-féle eljárást továbbfejlesztette. A bevezetett *Papadakis – Bresson*-féle tényező módosító hatása a nagyobb hőmérsékletek esetén nagyobb, ezért a módszert „súlyozott érés"-nek (hollandul: gewogen rijpheid, angolul: weighted maturity; németül: gewichtete Reife; franciául: maturité pondéré) nevezték (jele *cal R*), amelynél magyarul talán kifejezőbb a „cementfüggő" érés megnevezés.

A *10. ábrán* látni, hogy *Papadakis* és *Bresson* az érési idő diagram alatti területet az abszcissza-tengellyel párhuzamosan 20 °C hőmérséklettől felfele 10 °C hőmérséklet terjedelmű részekre osztotta, és a kapott s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6 nagyságú területeket n = 0, 1, 2, 3, 4, 5 sorszámmal látta el. Bevezették az „A" tényezőt, amely a cement tulajdonságaitól függő állandó szám, amelynek az n sorszám a hatvány kitevője. Minden n-edik s_{n+1} nagyságú területet az „A^n" tényezővel megszorozták. A 20 °C hőmérséklet alatti s_1 terület szorzója $A^0 = 1{,}0$; a (20 – 30) °C közötti s_2 területé $A^1 = A$; és így tovább. Az $s_{n+1} \cdot A^n$ szorzatokat összeadva kapták a *„súlyozott" (cementfüggő) érési óra-fok számot*:

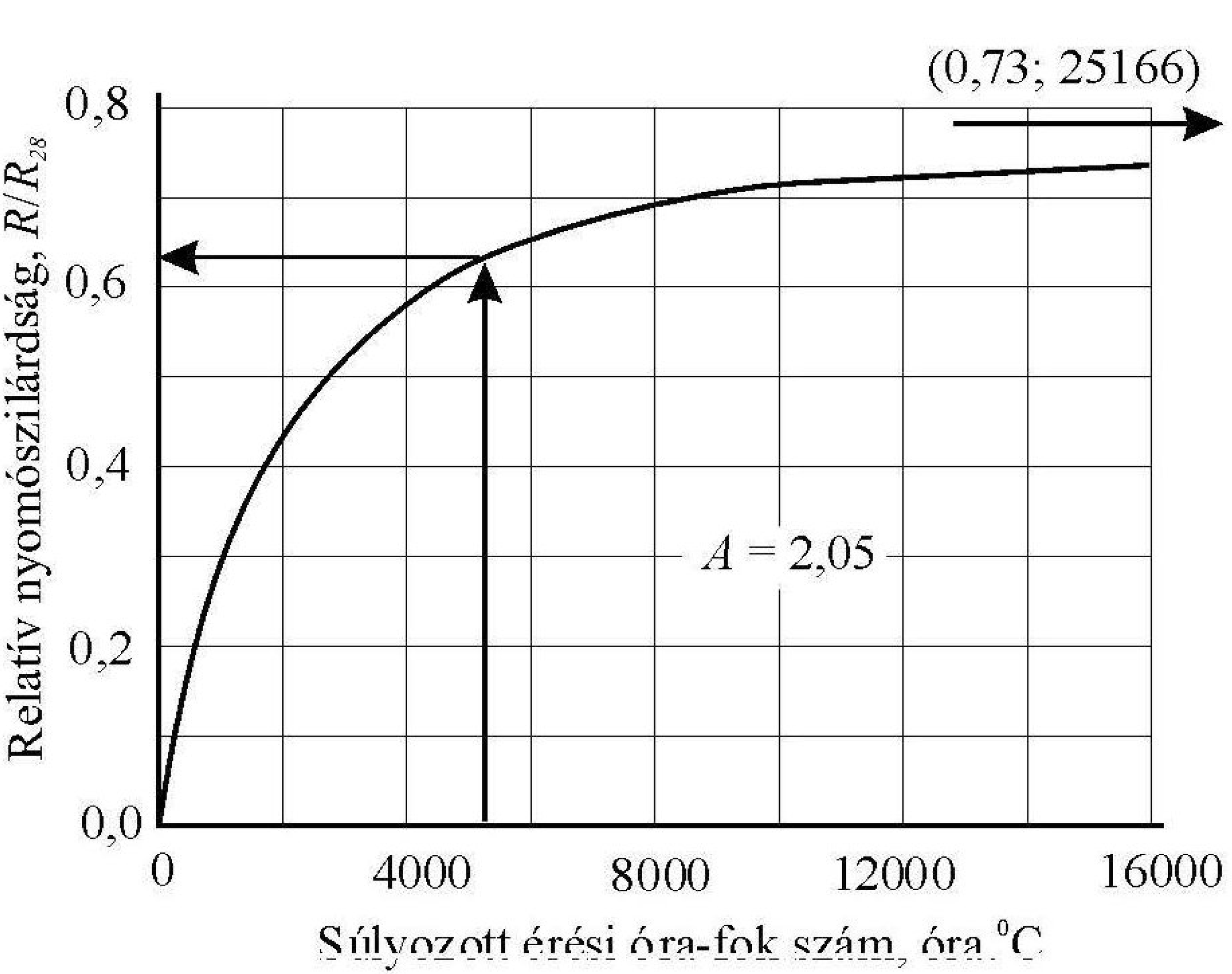
$$F_{mp} = \sum_{n=0}^{i} s_{n+1} \cdot A^n \quad [óra \cdot {}^oC] \tag{6}$$

A (6) szerinti *Papadakis – Bresson*-féle összefüggés a *DAfStb Heft 422.* kiadvány (*Bunke,* 1991) 4.2.2 fejezetében is megtalálható.



10. ábra: A „súlyozott” (cementfüggő) érési óra-fok szám meghatározása *Papadakis – Bresson* szerint (1973)

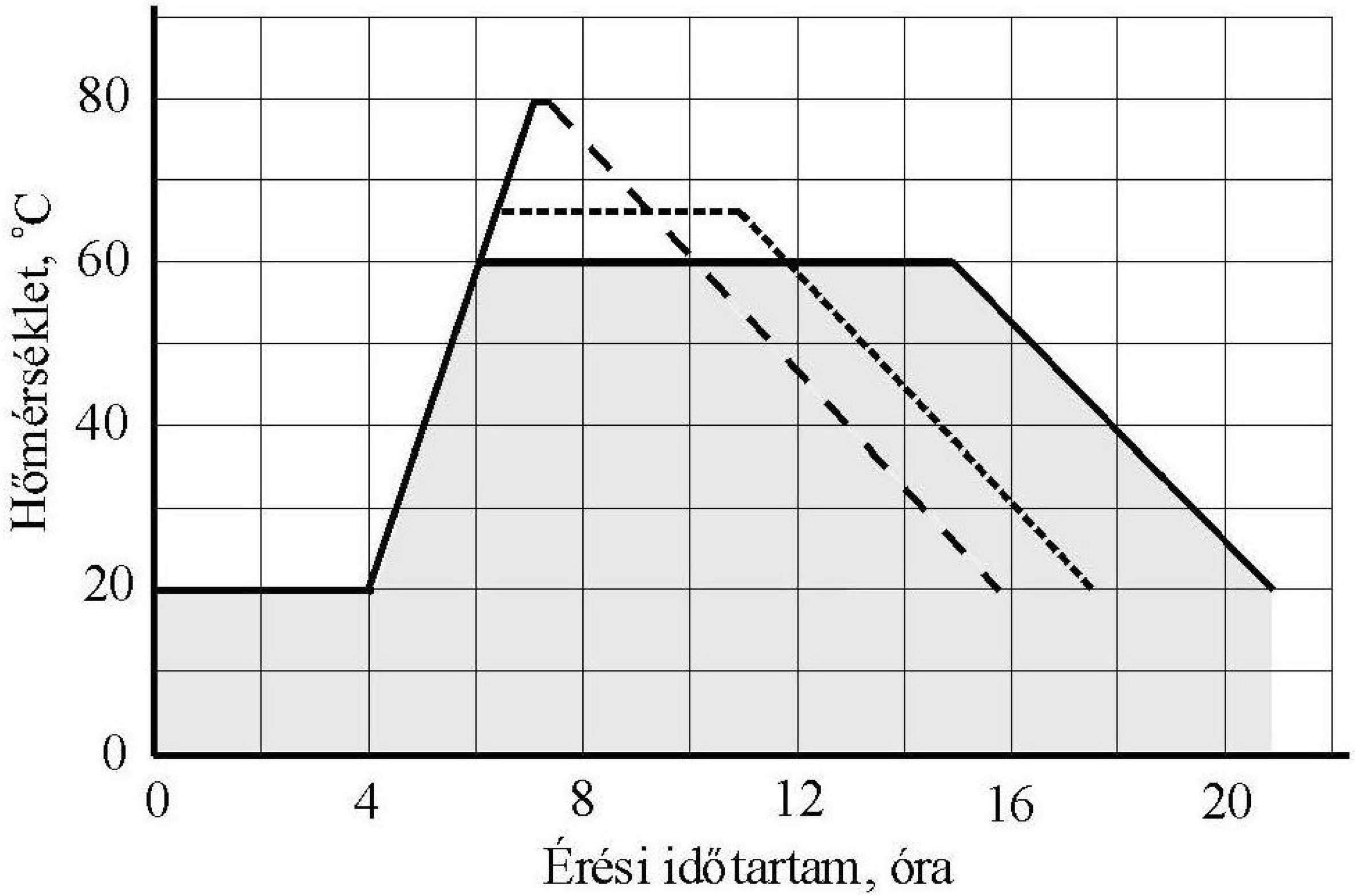
Papadakis és *Bresson* a relatív nyomószilárdságot (R/R_{28}) az *idő-fok számhoz* tartozó nyomószilárdságnak (R) és a 20 °C hőmérsékleten tárolt 28 napos próbatestek nyomószilárdságának (R_{28}) hányadosaként fejezte ki a cementfüggő érési idő-fok szám függvényében. Az összesen hat különböző cementtel készült és különböző hőmérsékleten érlelt próbatestek *Papadakis – Bresson*-féle érési diagramjai közül a mai CEM III 32,5 jelű kohósalakcementnek megfelelő cement (CLK 325, Ciment de Laitier de Haut-Fourneaux au Clinker, a cement betűjele után álló szám a cement nyomószilárdsága 28 napos korban, bar-ban kifejezve, 1 bar = 0,1 N/mm^2) érési diagramját mutatjuk be a *11. ábrán*, amely szerint a vizsgált kohósalakcement 28 napos nyomószilárdságának felét (R/R_{28} = 0,5) mintegy 3000 óra·°C érési óra-fok szám mellett el lehet érni.



11. ábra: A CLK 325 jelű francia kohósalakcementtel készített 40·40·160 mm méretű próbatestek *Papadakis – Bresson*-féle „súlyozott" (cementfüggő) érési diadramja

A *Papadakis – Bresson*-féle 3000 óra·°C érési óra-fok számú érési diagram változatok közül a technológiailag legkedvezőbbet célszerű alkalmazni (*12. ábra*).

A *Papadakis – Bresson*-féle módszer hátránya, hogy csak 20 °C hőmérséklet felett használható, 20 °C hőmérséklet alatt minden cement egyforma hőérzékenységűnek tűnik, ami nem felel meg a valóságnak, hiszen például kis hőmérsékleten a CEM III/B típusú kohósalakcement szilárdulása lassabb, mint a CEM I tiszta portlandcementé.

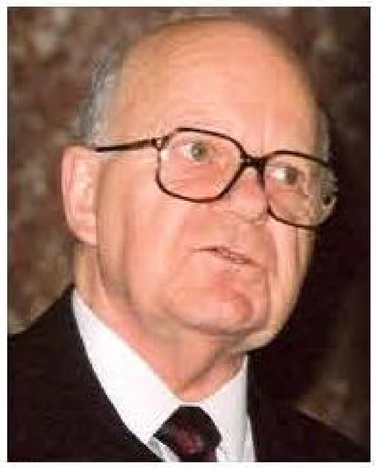


12. ábra: A Papadakis – Bresson-féle 3000 óra·oC érési óra-fok számú betonok érési diagram változatai

A cikk következő részében a de Vree-féle modellt és a CEMIJ-féle számítási módszert tárgyaljuk. Az összefoglalás, a jelölések, a szabvány és szakirodalmi hivatkozások jegyzéke a harmadik rész végén található.

A FIATAL BETON SZILÁRDULÁSI FOLYAMATÁNAK MODELLJEI SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS
2. RÉSZ: A DE VREE-FÉLE MODELL ÉS A CEMIJ-FÉLE SZÁMÍTÁSI MÓDSZER

Vasbetonépítés, 2011. 3. szám. pp. 72-77.



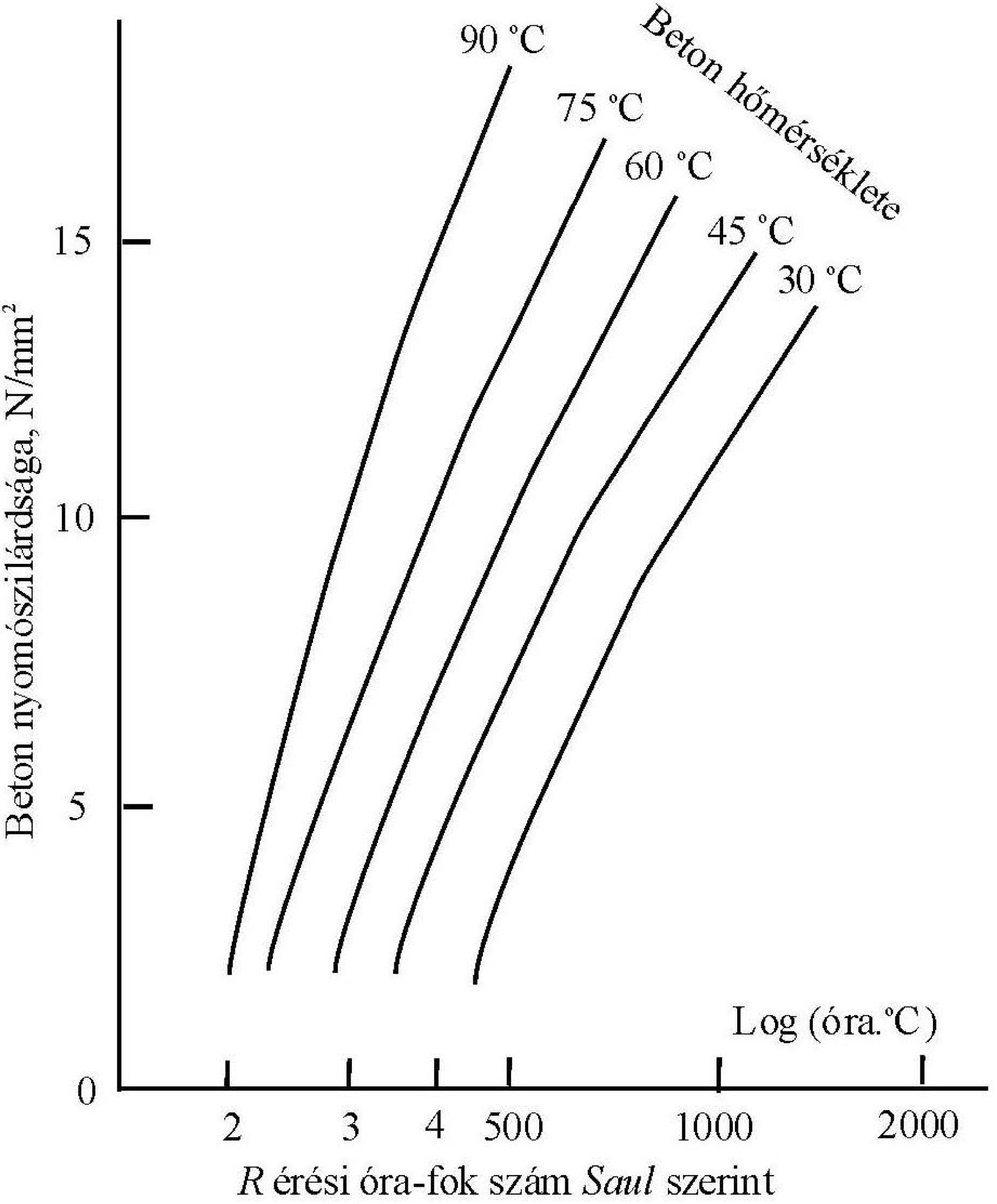
Dr. Kausay Tibor

A cikk 1. része a Vasbetonépítés 2011/2. számában jelent meg.

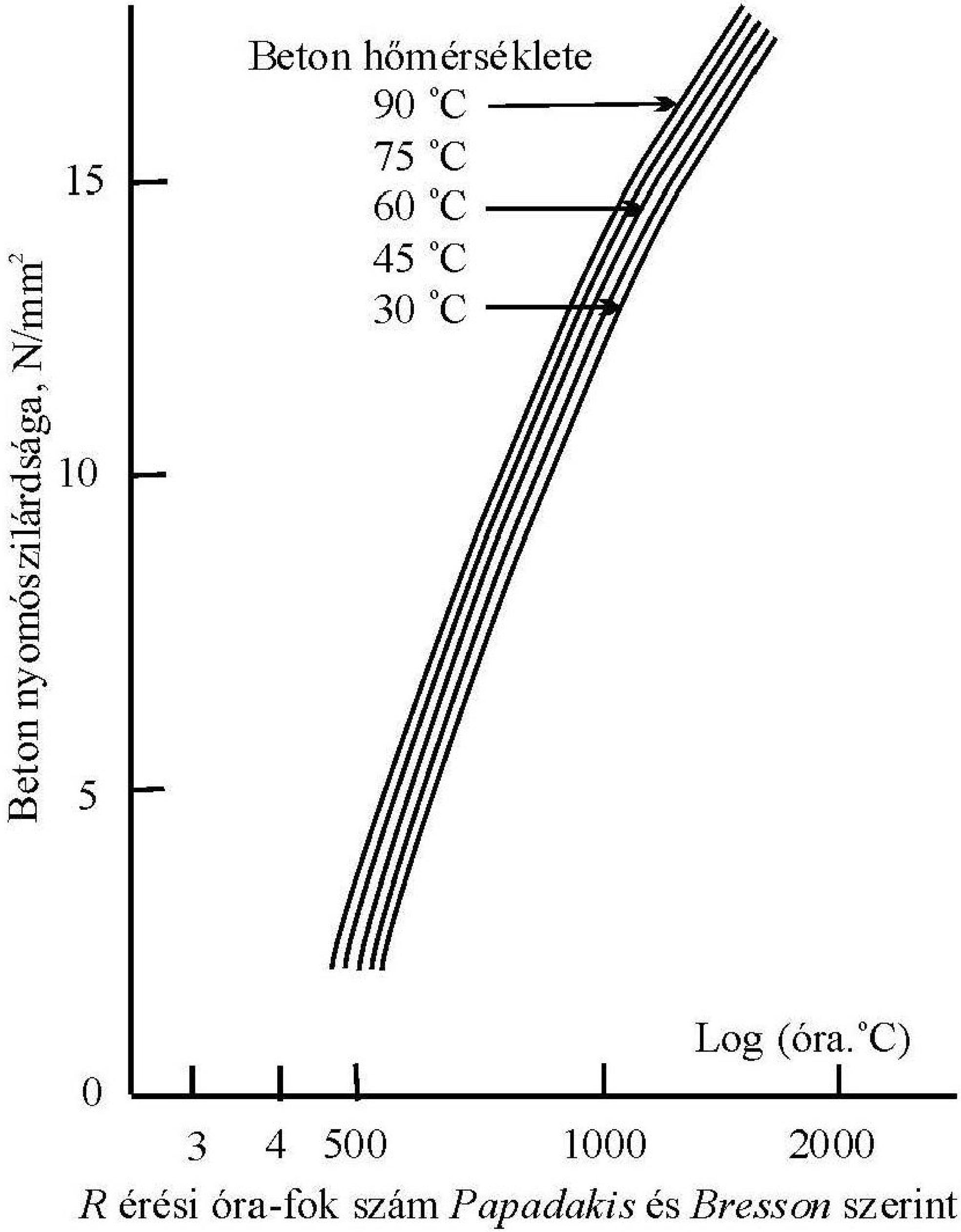
4. DE VREE-FÉLE BETONSZILÁRDULÁSI MODELL

A holland *de Vree* úgy alakította át a *Papadakis – Bresson*-féle módszert, hogy az 20 °C hőmérséklet alatt is használható legyen. Noha a *de Vree*-féle és a *Papadakis – Bresson*-féle módszer nagyon hasonló, a kettő nem cserélhető fel, mert az érési idő-fok szám értékére a két módszer szerint számolva más eredmény adódik.

De Vree és *Tegelaar* (1998) – a *Saul*-féle tétel kritikájaként – holland cementgyári kísérletek – amelyeket különböző fajtájú és szilárdsági osztályú cementekkel végeztek –, eredményét dolgozta fel a *Saul*-féle módszerrel, és megállapította, hogy azonos érési óra-fok szám esetén a beton nyomószilárdsága nem azonos, hanem a hőmérséklet növekedésével növekszik (*13. ábra*). Ugyan ezeket a kísérleti eredményeket átszámolták és ábrázolták a *Papadakis – Bresson*-féle módszer szerint is *(14. ábra*), és az utóbbi esetben a cementfüggő érési idő-fok szám függvényében valamennyi érési hőfok esetén közel azonos szilárdságokat kaptak.



13. ábra: Érési idő-fok szám – beton nyomószilárdság összefüggés. Holland kísérleti eredmények a *Saul*-féle módszerrel feldolgozva. A *Saul*-tétel kritikája. Forrás: *De Vree – Tegelaar*, 1998.



14. ábra: Cementfüggő érési idő-fok szám – beton nyomószilárdság összefüggés. Holland kísérleti eredmények a *Papadakis – Bresson*-féle módszerrel feldolgozva. Forrás: *De Vree – Tegelaar*, 1998.

A *Papadakis – Bresson*-féle modell korlátainak feloldására *de Vree* bevezetett egy új, cement hőérzékenységet kifejező „*C*" tényezőt (németül: Wichtungsfaktor für die Zementart) és a „javított cementfüggő" (korrigált) érési óra-fok szám (németül: gewichtete Reife) fogalmát:

$$R_{\text{de Vree}} = \Sigma r_i \cdot \Delta t_i \quad [\text{óra}\cdot^\circ\text{C}] \tag{7}$$

ahol:

$R_{\text{de Vree}}$ a beton érését (a hidratáció előrehaladtát) kifejező „javított cementfüggő” óra-fok szám *de Vree* szerint

r_i az adott szilárdulási időtartam (óra) alatt változatlan „javított cementfüggő” betonhőmérséklet, °C-ban kifejezve, amely a *de Vree*-féle cement hőérzékenységi C tényező függvénye

Δt_i a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan (T_i), órában kifejezve

i a szilárdulási időtartam (intervallum) sorszáma, i = 1, 2, 3…n

Az 1 óra szilárdulási időtartam alatt változatlan „javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérséklet *de Vree* szerint:

$$r_i = \int_{-10\ ^oC}^{T_i} \left(C^{(0{,}1\cdot T_i - 1{,}245)}\right) dT = \frac{10}{\ln C} \cdot \left(C^{(0{,}1\cdot T_i - 1{,}245)} - C^{-2{,}245}\right) \quad [^oC] \tag{8}$$

ahol:

T_i a beton átlaghőmérséklete a szilárdulási időtartam (1 óra) alatt, °C-ban kifejezve

C a cement hőérzékenységét kifejező *de Vree*-féle tényező

A C tényező kitevője $n = 0{,}1 \cdot T_i - 1{,}245$, amelynek kerek értékei a T_i átlagos betonhőmérséklet függvényében az *1. táblázatban* láthatók.

A *de Vree*-féle r_i „javított cementfüggő” betonhőmérséklet a T_i = -10 °C hőmérsékleten a C tényező bármely értéke esetén nulla értéket vesz fel, tehát *de Vree – Saullal* megegyezően – feltételezi, hogy -10 °C hőmérsékleten a beton hidratációja megáll, azaz ha T_i = -10 °C, akkor r_i = 0,0 (*15. ábra*).

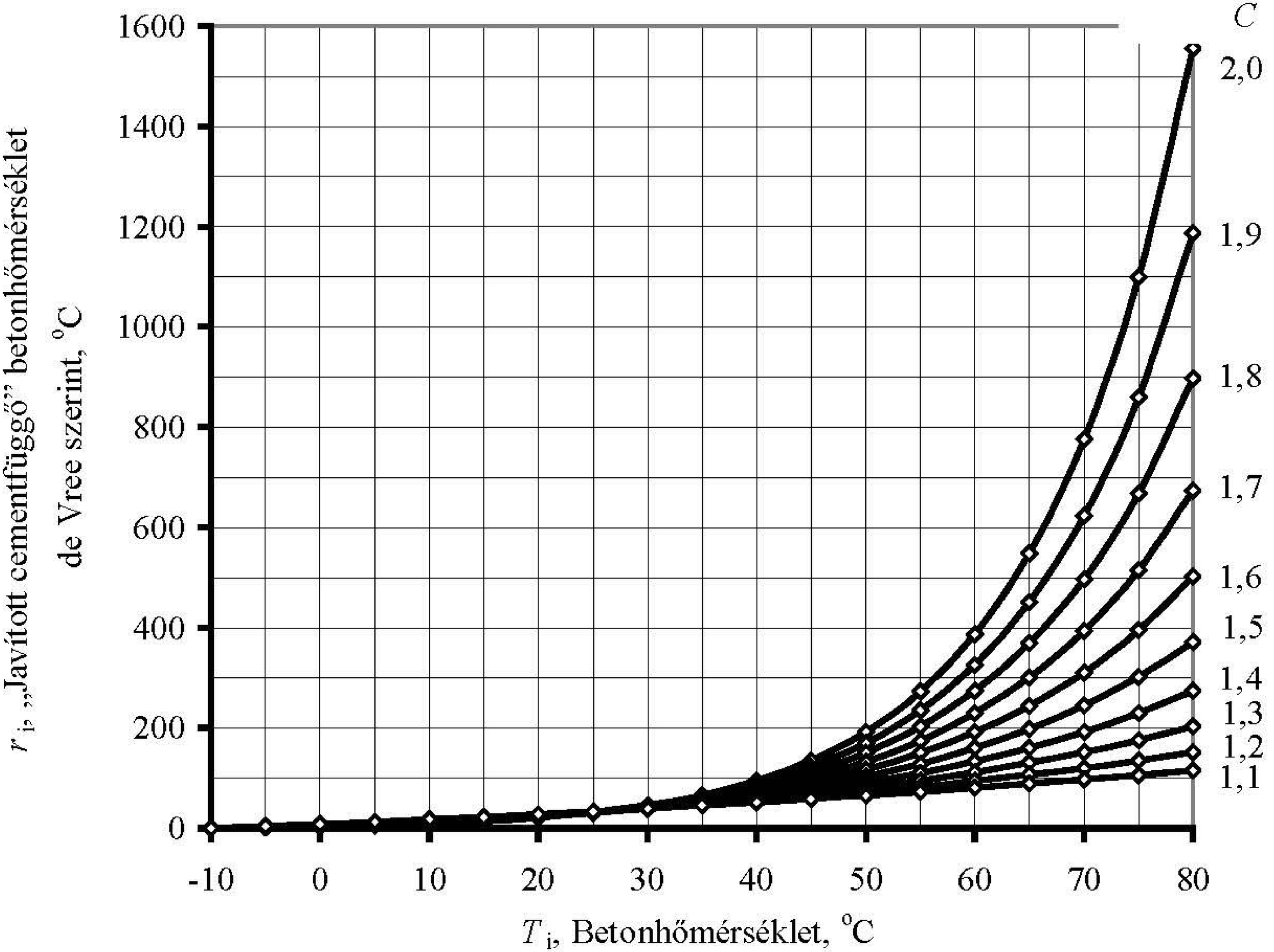
De Vree szerint például a C = 1,60 tényezőjű cementtel készült, Δt_i = 1 órán át 10 °C hőmérsékleten szilárduló beton korrigált hőmérséklete r_i = 11,6 °C. Ha ugyanez a cement 10 °C hőmérsékleten Δt_i = 24 órán át szilárdul, akkor a *de Vree-féle* „javított cementfüggő” (korrigált) érési óra-fok szám $R_{\text{de Vree}} = \Sigma r_i \cdot \Delta t_i = 11{,}6 \cdot 24 = 278{,}4$ óra·°C, de ha 35 °C hőmérsékleten szilárdul Δt_i = 24 órán át, akkor $R_{\text{de Vree}} = \Sigma r_i \cdot \Delta t_i = 54{,}0 \cdot 24 = 1296{,}0$ óra·°C a *de Vree-féle* „javított cementfüggő” érési óra-fok szám.

A *de Vree*-féle C tényezőt minden cementre külön kell meghatározni, mert az a cement összetételének, illetve klinker-tartalmának függvénye, amelyre a *2. táblázat* tartalmaz javasolt hozzávetőleges értékeket.

A *de Vree*-féle modell a fiatal beton szilárdulási folyamatának kifejezésére, *például az előfeszítés, a kizsaluzás, az emelés, az utókezelési időtartam* meghatározására előnyösen alkalmazható.

1. táblázat: Példák a C tényező $n = 0{,}1 \cdot T_i - 1{,}245$ kitevőjére

Hőmérséklet °C	T_i, Átlagos hőmérséklet, °C	n
-10 – -5	-7,5	-2,0
-5 – 0	-2,5	-1,5
0 – 5	2,5	-1,0
5 – 10	7,5	-0,5
10 – 15	12,5	0,0
15 – 20	17,5	0,5
20 – 25	22,5	1,0
25 – 30	27,5	1,5
30 – 35	32,5	2,0
35 – 40	37,5	2,5
40 – 45	42,5	3,0
45 – 50	47,5	3,5
50 – 55	52,5	4,0
55 – 60	57,5	4,5
60 – 65	62,5	5,0
65 – 70	67,5	5,5
70 – 75	72,5	6,0
75 – 80	77,5	6,5
80 – 85	82,5	7,0
85 – 90	87,5	7,5
90 – 95	92,5	8,0



15. ábra: „Javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérséklet *de Vree* szerint (r_i) a betonhőmérséklet (T_i) és a cement hőérzékenységét kifejező C tényező függvényében, a (8) összefüggés alapján

2. táblázat: A *de Vree*-féle *C* tényező javasolt hozzávetőleges értéke

De Vree-féle *C* tényező *hozzávetőleges* értéke	Kohósalak tartalmú cement klinker-tartalma tömeg%	Példa a cement típusra	Javaslat forrása
1,15		CEM I 52,5 R [a]	Holland
1,25 – 1,35		CEM I	Német [b]
1,30	> 65	CEM I; CEM II	Német [b]
1,30 – 1,40		CEM II/B-S	Német [b]
1,35		CEM III/A 42,5 N LA [a] (kis alkáli tartalmú, kis hőfejlesztésű kohósalak-cement)	Holland
1,35 – 1,45		CEM III/A	Német [b]
1,40	50 – 64	CEM III/A; CEM V/A	Német [b]
1,40 – 1,60		CEM III/B	Német [b]
1,45		CEM III/A 52,5 N LA [a] (kis alkáli tartalmú, kis hőfejlesztésű kohósalak-cement)	Holland
1,50	33 – 49	CEM III/A; CEM V/A	Német [b]
1,50		CEM III/B 42,5 N HSR LA [a] (kémiailag agresszív, szerves anyagokat is tartalmazó vizeknek ellenálló, kis alkáli tartalmú, kis hőfejlesztésű cement)	Holland
1,55		CEM III/B	Holland
1,60	20 – 34	CEM III/B; CEM V/B	Német [b]

[a] Belga Holcim cement, *CRIC-OCCN* (Centre National de Recherches Scientifiques et Techniques de l'Industrie Cimentiere) / (Nationaal Centrum voor wetenschappelijk en technisch Onderzoek der Cementnijverheid, Belga Nemzeti Cementipari Tudományos és Technikai Kutatási Központ, Brüsszel) vizsgálati eredmények. Forrás: *Vermeersch*, 2005.
[b] Forrás: Beton-Kalender 2009.

A *3. táblázatban* számpélda található a *de Vree*-féle óra-fok szám ($R_{\text{de Vree}}$) meghatározására. A vizsgált időtartam 16 óra, amelyre a beton változó hőmérsékletét óránkénti átlagával (T_i) adtuk meg. Az átlagos „javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérsékletet a beton átlaghőmérsékletéből az r_i összefüggés felhasználásával számítottuk ki minden órára (a *3. táblázatban* soronként), annak feltételezésével, hogy a cement hőérzékenységét kifejező tényező értéke $C = 1{,}30$. Az óránkénti r_i hőmérsékleteket összegezve megkaptuk a *de Vree-féle* „javított cementfüggő" (korrigált) érési óra-fok számot, amely példánk esetén a vizsgált 16 órás időtartam végén $R_{\text{de Vree}} = 839{,}74$ óra·°C. A *3. táblázatbeli* számpéldát grafikusan a *16. ábrán* rajzoltuk meg.

De Vree alapvetően követte Saul felfogását, amely szerint a beton f_{cm} nyomószilárdsága arányos a betonérési óra-fok szám (R) logaritmusával, illetve módosította annyiban, hogy arányos a *korrigált* betonérési óra-fok szám ($R_{\text{de Vree}}$) logaritmusával, vagy ami ugyanazt jelenti, – mert LN $R_{\text{de Vree}} = 2{,}302585 \cdot \text{LOG}\ R_{\text{de Vree}}$ – természetes alapú logaritmusával:

$$f_{cm} = a \cdot (\text{LN}\ R_{\text{de Vree}}) + b$$

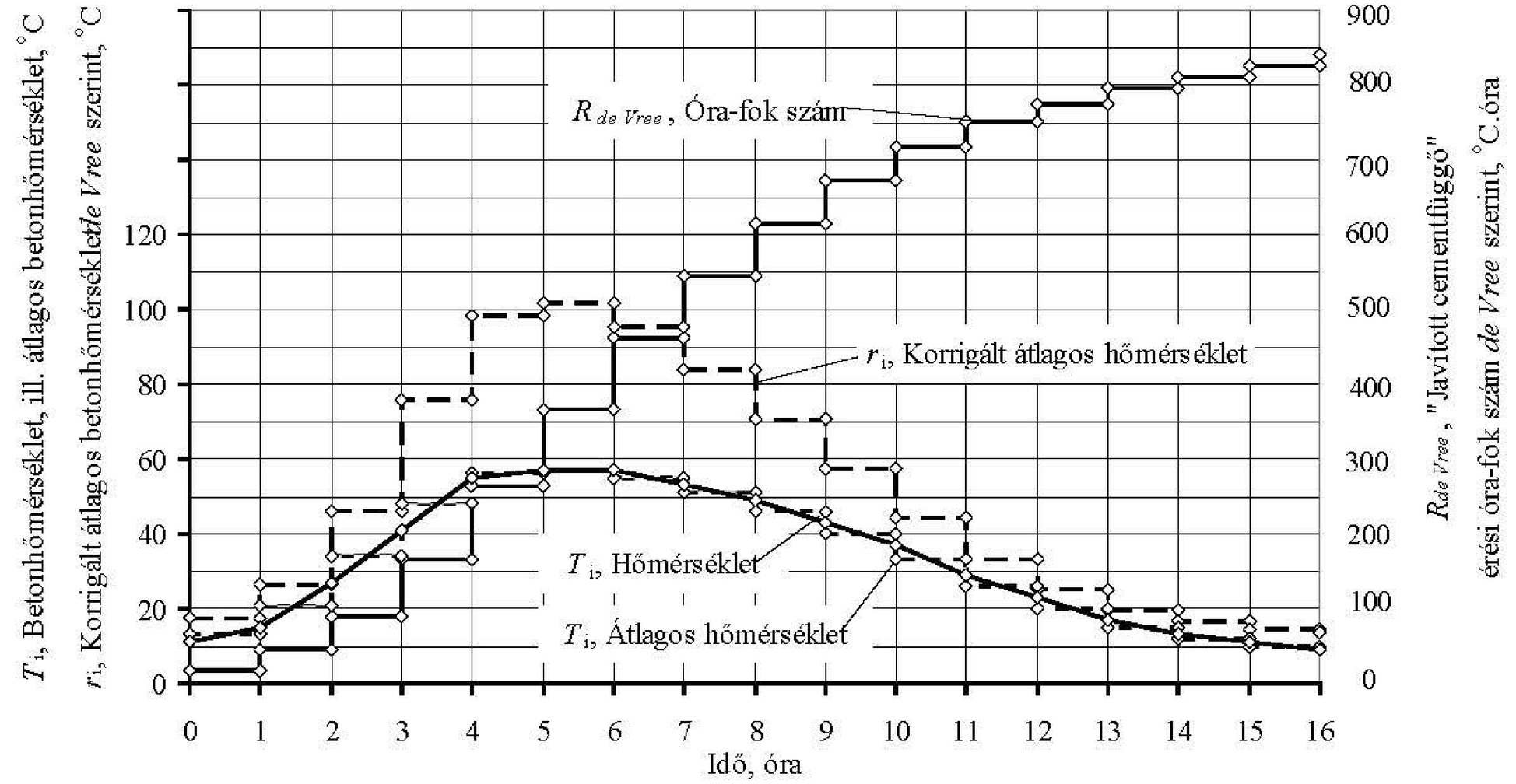
A természetes alapú logaritmus beosztású abszcissza-tengely felett ábrázolt regressziós $f_{cm} = f\ (\text{LN}\ R_{\text{de Vree}})$ függvény egyes alakú. Ezt az ábrát $R_{\text{de Vree}}$-féle betonérési diagramnak (németül: Eichgraphik) nevezzük (*17. ábra*), de nevezik főképp Hollandiában – a *C* tényező

számítási módszere után (lásd később) – *Cemij*-féle diagramnak is. A betonérési diagramot általában a beton gyártója készíti el egy olyan betonszilárdsági tartományra, amely a beton alkalmazása során előfordul, de elkészítheti a cementgyár is különböző nyomószilárdsági osztályú „etalon” betonok esetére a saját cementjeivel.

3. táblázat: Számpélda a *de Vree*-féle óra-fok szám számítására, ha a cement hőérzékenységi tényező értéke $C = 1{,}30$ (lásd a *16. ábrát*)

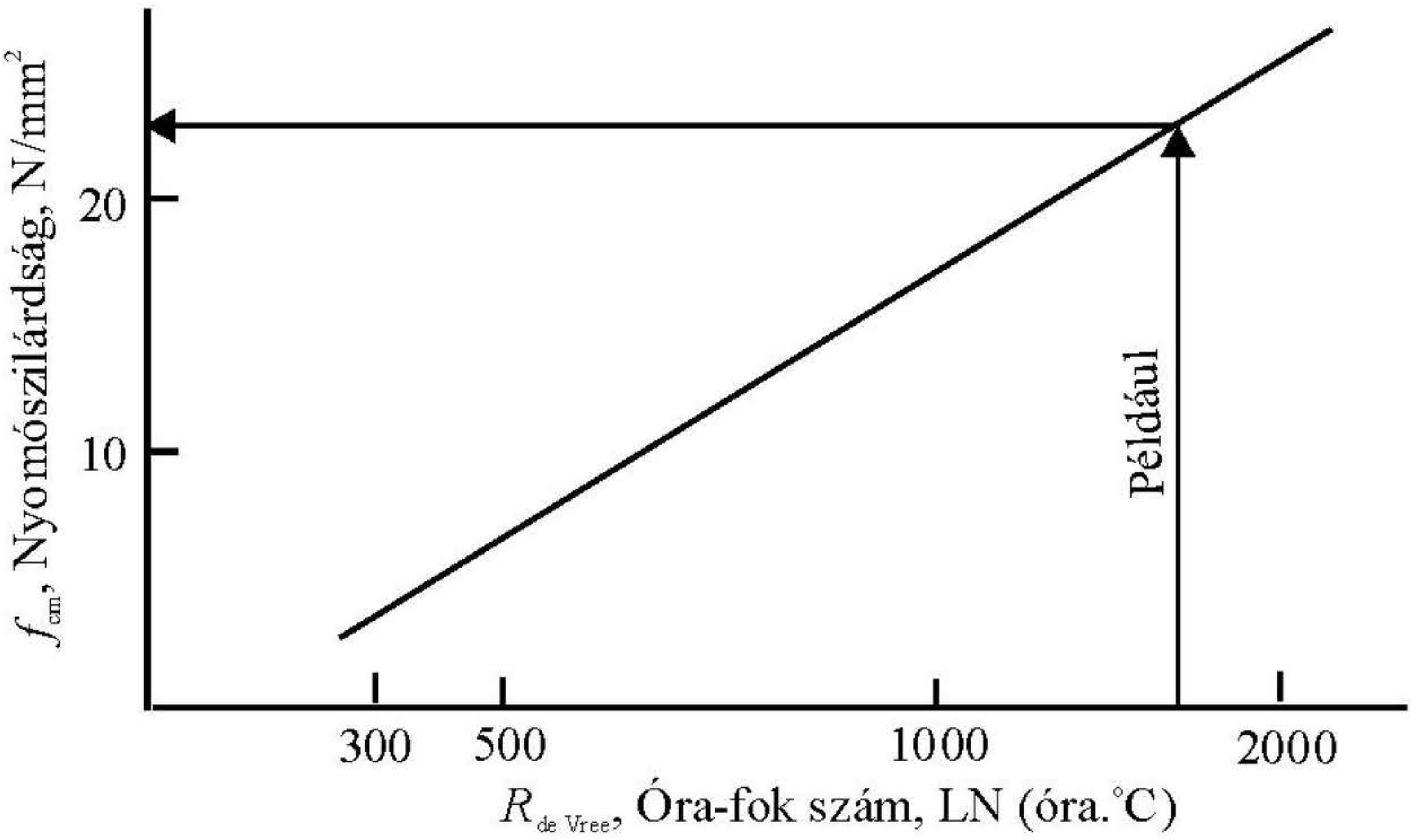
t_i Idő óra	T_i Beton-hőmérséklet °C	$T_{i\ átl}$ Átlagos beton-hőmérséklet °C	r_i, Korrigált átlagos beton-hőmérséklet, °C, ha $C = 1{,}30$	$R_{de\ Vree}$, *de Vree*-féle óra-fok szám °C·óra
0	11	13	17,52	17,52
1	15	21	26,55	44,07
2	27	34	45,94	90,01
3	41	48	75,72	165,72
4	55	56	98,34	264,06
5	57	57	101,51	365,58
6	57	55	95,24	460,82
7	53	51	83,65	544,47
8	49	46	70,76	615,23
9	43	40	57,38	672,61
10	37	33	44,20	716,81
11	29	26	33,24	750,04
12	23	20	25,32	775,36
13	17	15	19,60	794,96
14	13	12	16,52	811,48
15	11	10	14,59	826,07
16	9	9	13,67	839,74

A betonérési diagram regressziós egyenese egy adott összetételű beton $R_{de\ Vree}$-féle óra-fok száma és f_{cm} nyomószilárdsága között jelenít meg összefüggést. Más összetételű betonra más betonérési diagram érvényes. Ha az ugyanazon cementtel készült betonoknak például (csak) a víz-cement tényezője különbözik, akkor azok betonérési regressziós egyenesét külön-külön kell megszerkeszteni (*18. ábra*). A *18. ábra* nagyon tanulságos, $R_{de\ Vree} = 900$ óra·°C óra-fok számhoz $x = 0{,}55$ víz-cement tényező esetén $f_{cm} = 12$ N/mm^2, $x = 0{,}50$ víz-cement tényező esetén $f_{cm} = 16$ N/mm^2 nyomószilárdság tartozik.

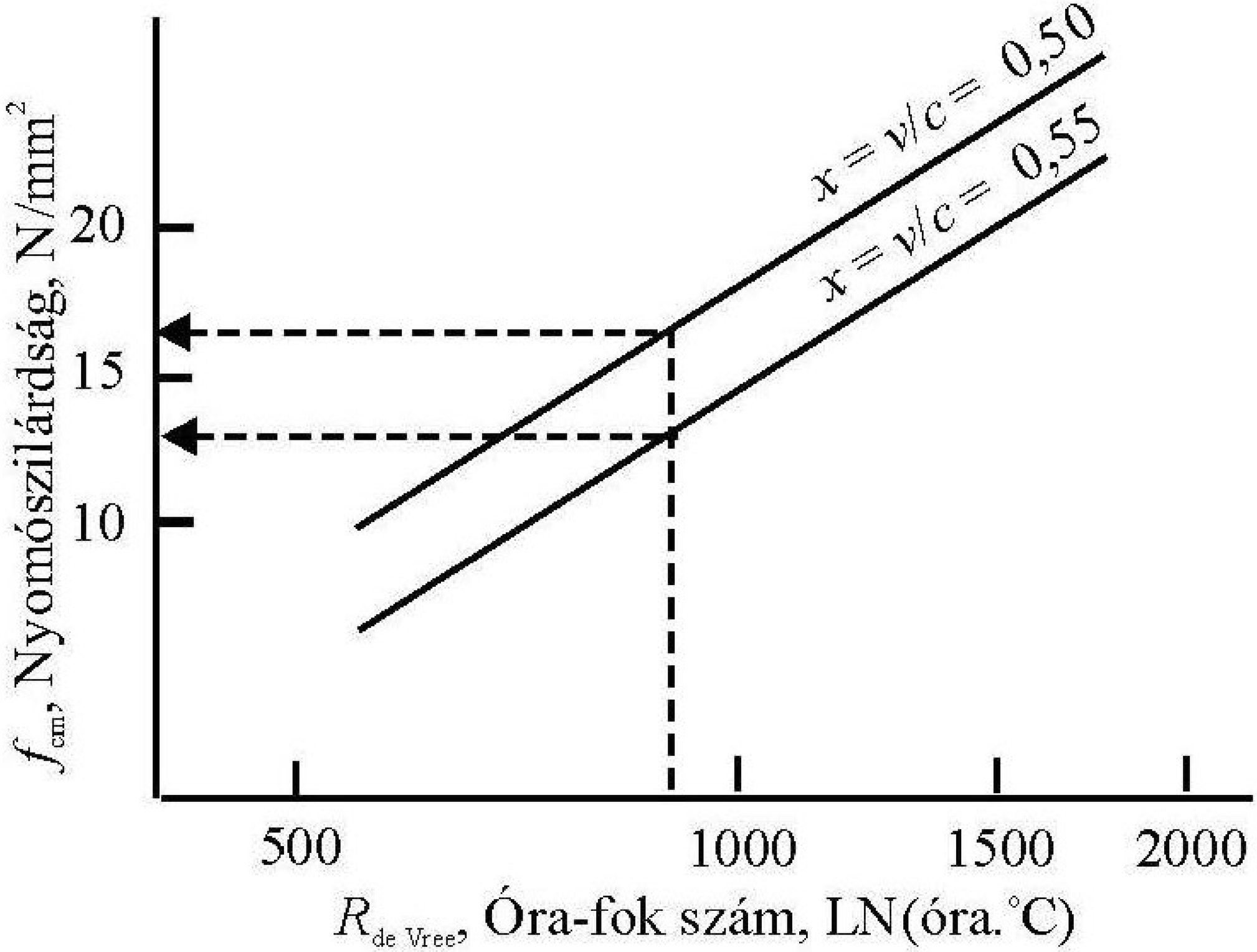


16. ábra: Számpélda (lásd a *3. táblázatot*) a *de Vree*-féle óra-fok szám számítására, ha a cement hőérzékenységi tényezőjének értéke $C = 1{,}3$

Közbevetőleg megjegyezzük, hogy ebben a dolgozatban – esetenként elvonatkoztatva a régebbi értelmezésektől – az f_c (a *11. ábrán* a jele: R) nyomószilárdság alatt mindig a szabványos (MSZ EN 206-1:2002, MSZ EN 1992-1-1:2010), Ø150·300 mm méretű, végig víz alatt tárolt próbahengereken mért nyomószilárdságot (f_{ci}), illetve azok átlagértékét (f_{cm}) értjük.



17. ábra: Összefüggés az $R_{\text{de Vree}}$-féle óra-fok szám és a beton f_{cm} nyomószilárdsága között ($R_{\text{de Vree}}$-féle betonérési diagram) egy adott összetételű betonra. Forrás: *Egmond – Jacobs*, 1999, a *Vereniging Nederlandse Cementindestrie* 1984 évi cikke után



18. ábra: Összefüggés az $R_{de\ Vree}$-féle óra-fok szám és a beton f_{cm} nyomószilárdsága között ($R_{de\ Vree}$-féle betonérési diagram) ugyanazon cementtel, de különböző x víz-cement tényezővel készült betonokra. Forrás: *Egmond – Jacobs*, 1999, a *Vereniging Nederlandse Cementindustrie* 1984 évi cikke nyomán

A szabályozott *de Vree*-féle betonérési fok, illetve szilárdság becslési módszer leírását a holland NEN 5970:2001 szabvány tartalmazza.

A betonérési fok vizsgálatát (németül: Reifegradprüfung) a módszer megnevezése és részletek ismertetése nélkül az *állványzat eltávolíthatósága* és a *beton kizsaluzhatósága* idejének meghatározására a DIN 1045-3:2001 és az újabb DIN 1045-3:2008 szabvány 5.6.1 fejezete, a *kiszás számításához az első terhelés időpontjához tartozó betonérési fok* meghatározására a *DIN-Fachbericht 102:2009* jelentés 3.1.5.5 fejezete tárgyalja.

A beton érési folyamatát már az 1970-es években műszerekkel vizsgálták (*Freiesleben Hansen – Pedersen*, 1977). Korszerű, több típusból álló, négy mérőhelyes elektronikus betonérés vizsgáló-értékelő műszer sorozatot (MC 900 rijpheids - computer) a *Verboom Betontechniek* cég (Moordrecht, Hollandia) 1984-ben fejlesztett ki és gyárt (ma már nem feltétlenül egyedüli gyártóként), amellyel a betonelem gyártás, illetve a beton beépítés helyén is 1800 órán át folyamatosan mérhető a beton hőmérséklete (-10) – (+110) °C között, és a *de Vree*-féle módszer szerint kiszámítható és regisztrálható a C tényező 1,01-2,50 között és az érési óra-fok szám egészen 6554 óra·°C értékig. Az eljárás a 28 napos beton nyomószilárdság 70 %-ig alkalmazható. A műszer használatát a betontechnológia legkülönbözőbb területein a kizsaluzás, az utókezelés befejezése, a feszítés, a terhelés, a vágás, fúrás, megmunkálás, az emelés megfelelő időpontjának meghatározásához, stb. ajánlják (*Vereniging Nederlandse*

Cementindustrie, 1984; *De Vree – Tegelaar*, 1998; *Tegelaar*, 2002; *Iken – Lackner – Zimmer – Wöhnl*, 2003). A műszer (németül: Verboom Reifecomputer) forgalmazója német nyelvterületen a HTK Tegelaar Agentur (Krefeld, Németország).

5. CEMIJ-FÉLE MÓDSZER A DE VREE-FÉLE C TÉNYEZŐ SZÁMÍTÁSÁRA

A *CEMIJ* (Cement Industrie IJmuiden) az *ENCI* (Eerste Nederlandse Cement Industrie) holland cementművek ijmuideni (Hollandia) cementgyárának a neve. Az ENCI a Heidelbergi Cement Csoport (*HeidelbergCement Group*) tagja.

Valamely adott cementhez tartozó tényleges *C tényező meghatározása* jellemző összetételű habarcs (például 40·40·160 mm méretű próbahasáb) vagy beton (például 150 mm méretű próbakocka) próbatestek szilárdulási folyamatának mérésén alapul. A méréshez azonos összetételű, de különböző hőmérsékleteken tárolt próbatest sorozatokat kell készíteni. Valamely sorozat mintáinak nyomószilárdságát különböző időpontokban meg kell határozni. A minta legalább három próbatestből álljon, egy nyomószilárdság adat tehát legalább három azonos hőmérsékleten tárolt, egy időpontban vizsgált próbatest nyomószilárdságának átlaga. A hőmérséklet az érési idő-hőmérséklet diagram (például *5. ábra*) alatti terület és az érési idő hányadosa, tehát az érési időhöz tartozó átlagos hőmérséklet.

A *de Vree*-féle *C* tényező számítására kidolgozott *CEMIJ*-féle módszert a DAfStb Heft 422. kiadvány (*Bunke*, 1991) 4.2.3 fejezetében is ismertetik.

A *C tényező számítását Vermeersch* (2005) Belgiumban készített diplomamunkája alapján *számpéldán mutatjuk be*. A kísérleti beton 400 kg/m^3 adagolású CEM III/A 52,5 N LA jelű belga kohósalakcementtel, $x = v/c = 188/400 = 0{,}47$ víz-cement tényezővel, a cement-adagolásra vett 0,3 tömeg% polikarboxilát alapú szuper-folyósító adalékszerrel, 4/7 mm szemnagyságú mészkő zúzottkő és 0/2 mm szemnagyságú kvarchomok adalékanyaggal készült. A beton próbakocka sorozatokat 30 °C, 20 °C, 15 °C és 10 °C hőmérsékleten, 80 % relatív páratartalmú klímaszekrényben tárolták. A három-három próbakockából álló minták nyomószilárdságát fiatal korban öt különböző időpontban és 28 napos korban vizsgálták. A számpélda kiindulási adatai a *4. táblázatban* szerepelnek. A fiatal beton szilárdulási folyamatának értékelésébe a 28 napos korú beton vizsgálati eredményeit – azok torzító hatása miatt – nem vontuk be.

4. táblázat: Számpélda alapadatai a C tényező számítására *Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

„A" kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, T_i = 30 °C		„B" kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, T_i = 20 °C	
Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2	Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2
9,17	6,1	16,00	6,2
10,90	9,5	17,83	7,6
12,00	12,3	19,83	9,5
13,17	14,1	21,67	11,5
14,30	16,0	25,50	14,6
672 (28 nap) *	54,0	672 (28 nap) *	54,8
„C" kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, T_i = 15 °C		„D" kísérlet sorozat Érési (tárolási) hőmérséklet, átlag, T_i = 10 °C	
Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2	Érési időtartam, Δt_i, óra	Nyomószilárdság, átlag, f_{cm}, N/mm^2
20,00	5,6	26,50	5,0
23,00	6,6	31,67	6,5
27,67	9,1	36,83	8,1
31,83	12,2	41,67	9,9
37,00	15,7	46,67	11,5
672 (28 nap) *	63,6	672 (28 nap) *	62,4
* A fiatal beton szilárdulási folyamatának értékelésébe a 28 napos korú beton vizsgálati eredményeit nem vontuk be.			

A kísérlet a fiatal korú betonra 4·5 = 20 idő-nyomószilárdság mérési értékpárt eredményezett. A számítás során különböző C tényezők feltételezése mellett, mind a 20 mérési értékpár felhasználásával logaritmikus (természetes alapú logaritmus beosztású vízszintes tengely felett egyenes alakú) összefüggést keresünk a *de Vree*-féle óra-fok szám ($R_{\text{de Vree}}$) és a nyomószilárdság (f_{cm}) között, és kiszámítjuk az összefüggés korrelációs együtthatójának négyzetét. A feladat megoldását az a $C_{\text{optimális}}$ tényező adja, amelyikhez a legnagyobb r^2 korrelációs együttható négyzet tartozik.

A C tényező számításának lépései a következők:

1. Fel kell venni a C tényező valamely értékét, például először legyen C = 1,10.
2. A felvett C tényező felhasználásával a (8) összefüggésből minden T_i átlagos betonhőmérsékletre meg kell határozni a *de Vree*-féle „javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérsékletet (r_i). Például C = 1,10, T_i = 30 °C esetén r_i = 39,31 °C.
3. A *de Vree*-féle „javított cementfüggő" (korrigált) betonhőmérsékletet (r_i) megszorozva a Δt_i érési (szilárdulási) idővel, megkapjuk a teljes érési időhosszra vonatkozó *de Vree*-féle „javított cementfüggő" (korrigált) érési óra-fok számot ($R_{\text{de Vree}}$), amelynek számítására a *3. táblázatban* és a *16. ábrán* mutattunk be példát. A számítást valamennyi Δt_i érési (szilárdulási) időre el kell végezni. Például, ha C = 1,10, T_i = 30 °C és Δt_i = 9,17 óra, akkor $R_{\text{de Vree}} = r_i \cdot \Delta t_i = 39{,}31 \cdot 9{,}17 = 360{,}47$ óra·°C.
4. Kiszámítjuk a meghatározott *de Vree-féle* „javított cementfüggő" (korrigált) érési óra-fok számok ($R_{\text{de Vree}}$) természetes alapú logaritmusát (LN $R_{\text{de Vree}}$), amelyhez mint független változóhoz (x_i) hozzárendeljük függő változóként (y_i) a nyomószilárdság átlagértékét (f_{cm}).

Például $C = 1{,}10$, $T_i = 30$ °C, $\Delta t_i = 9{,}17$ óra, illetve $R_{de\ Vree} = 360{,}47$ óra·°C esetén $x_i = \text{LN}\ R_{de\ Vree} = 5{,}887$ és $y_i = f_{cm} = 6{,}1$ N/mm^2.

5. A példa esetén 20 darab LN $R_{de\ Vree}$ – f_{cm} értékpárral rendelkezünk (*4. táblázat*), amelyeknek az adott C tényezőhöz tartozó értékeit grafikusan a természetes alapú logaritmikus beosztású abszcissza tengellyel és a lineáris beosztású ordináta tengellyel rendelkező koordináta rendszerben ábrázolhatjuk (lásd például a *18. ábrát*).
6. Következő feladatunk a felvett C tényezőhöz tartozó 20 darab LN $R_{de\ Vree}$ – f_{cm} értékpárra rajzolt regressziós egyenes „*a*” regressziós együtthatójának, „*b*” regressziós y tengely-metszetének, valamint az ezekkel kapott regressziós egyenes korrelációs együtthatója négyzetének (r^2) meghatározása.

A korrelációs együttható r^2 négyzete az $R_{de\ Vree}$ mért óra-fok számhoz (mint x_i értékhez) tartozó mért $f_{cm,i,mért}$ nyomószilárdság (mint y_i érték) és a regressziós függvényből számított $f_{cm,i,számított}$ nyomószilárdság (mint Y_i) érték közötti kapcsolat szorosságát fejezi ki:

$$r^2 = \frac{\left(\sum (y_i - \overline{y}) \cdot (Y_i - \overline{Y})\right)^2}{\sum (y_i - \overline{y})^2 \cdot \sum (Y_i - \overline{Y})^2} \qquad (9)$$

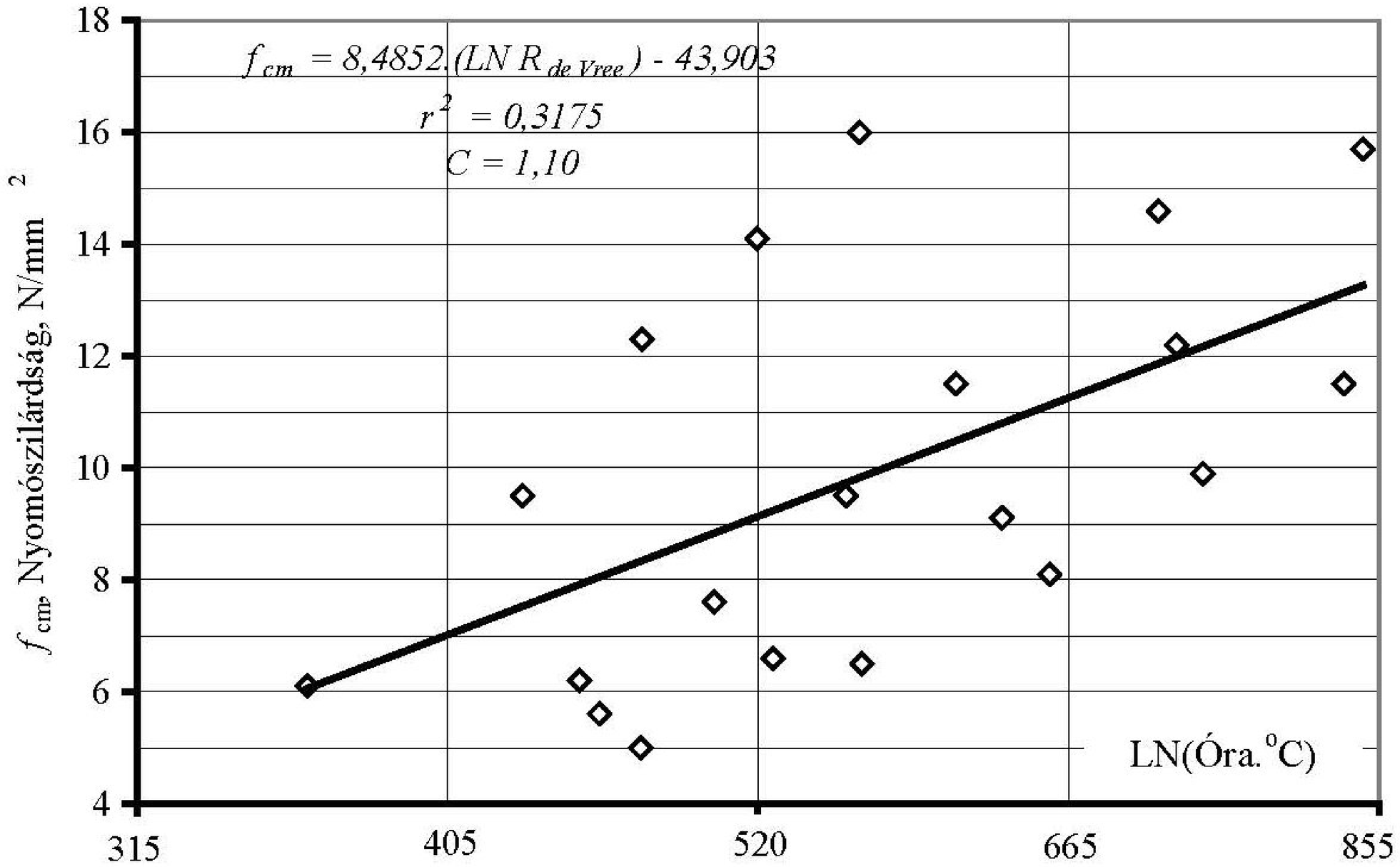
A kapcsolat annál szorosabb, minél inkább az 1,0-hez tart a korrelációs együttható négyzetének (r^2) az értéke.

Megjegyzés: A korrelációs együttható r betűjele véletlenül ugyanaz, mint a *de Vree*-féle „javított cementfüggő” (korrigált) betonhőmérséklet r_i betűjele, de a nemzetközi irodalomban így használják, ezért nem változtattuk meg.

A példa esetén a felvett $C = 1{,}10$ tényezőhöz tartozó regressziós egyenes egyenlete:

$$f_{cm} = 8{,}4852 \cdot (\text{LN}\ R_{de\ Vree}) - 43{,}903$$

és a korrelációs együttható négyzete $r^2 = 0{,}3175$, amelyet a *19. ábrán* ($R_{de\ Vree}$-féle betonérési diagram) tüntettünk fel.



19. ábra: A belga *CRIC-OCCN* kísérleti eredmények értékelése a holland *CEMIJ*-féle módszerrel. A példa szerinti összefüggés az $R_{de\ Vree}$-féle óra-fok szám és a beton f_{cm} nyomószilárdsága között ($R_{de\ Vree}$-féle betonérési diagram), ha a cement hőérzékenységi tényező értéke $C = 1{,}10$

7. Az 1. – 7. lépéseket újabb C tényezőkkel megismételve, az $f_{cm} = f\ (LN\ R_{de\ Vree})$ regressziós függvény és a hozzá tartozó korrelációs együttható négyzet meghatározását minél több felvett C tényező esetére el kell végezni. Példánk esetén a felvett C tényezőkhöz az *5. táblázatban* ($y_r2_{,i}$) adatként feltüntetett r^2 korrelációs együttható négyzeteket kaptuk.
8. A meghatározott C-r^2 értékpárokat – az *5. táblázat* jelölésével C-$y_r2_{,i}$ adatpontokat – (példánk esetén 22 darab) a *20. ábrán* lineáris koordinátarendszerben ábrázoltuk, és az ábrázolópontokra jól illeszkedő ötödfokú polinom alakú regressziós görbét fektettünk (*20. ábra*), amelynek egyenlete:

$$r_{fcm}^2 = -2{,}9684 \cdot C^5 + 27{,}608 \cdot C^4 - 99{,}481 \cdot C^3 + 172{,}5 \cdot C^2 - 142{,}73 \cdot C + 45{,}365$$

és korrelációs együtthatójának négyzete: $r^2 = 0{,}9998$.

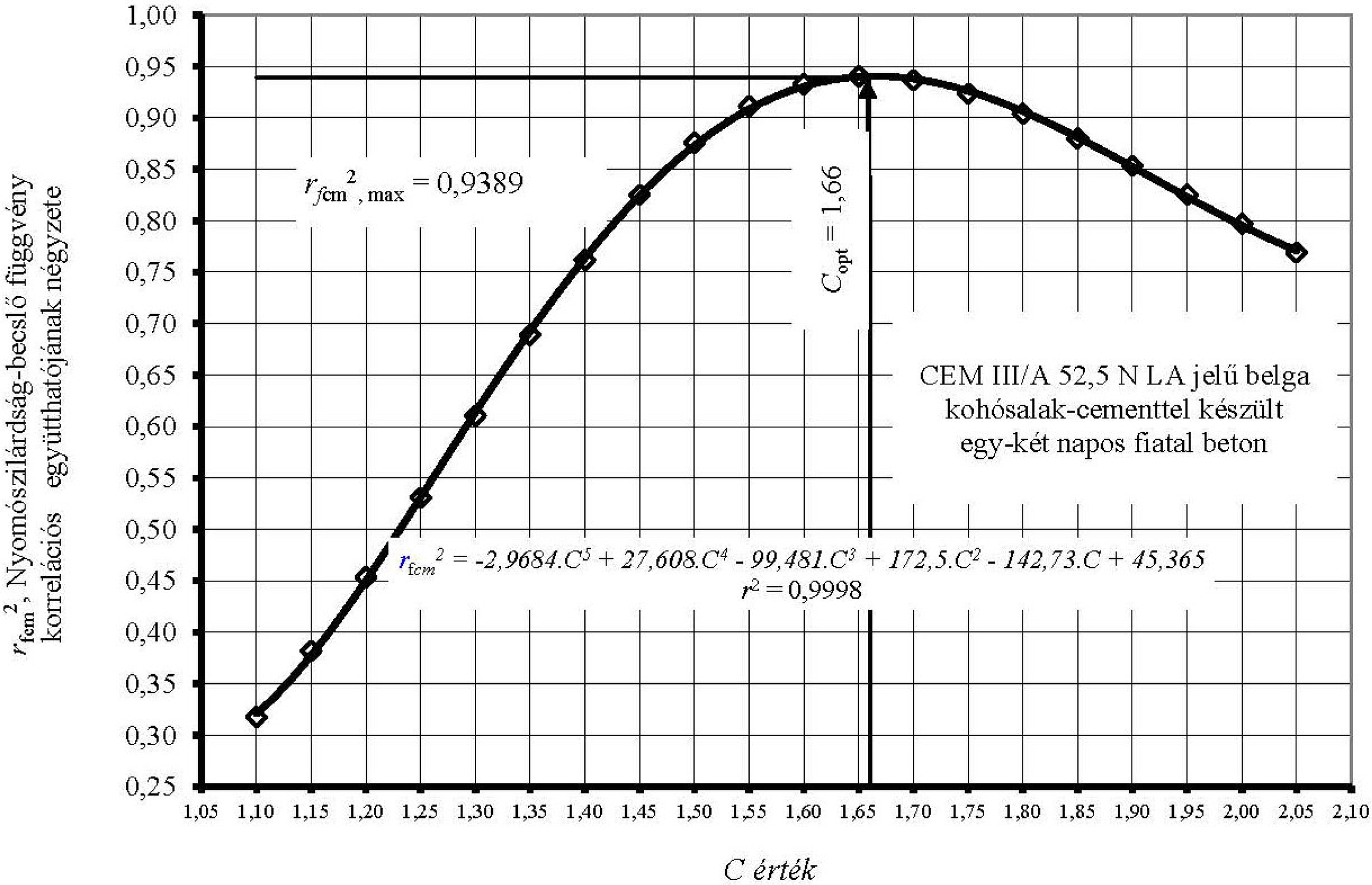
A regressziós ötödfokú polinom C abszcissza értékekhez tartozó r_{fcm}^2 ordináta értékeit az *5. táblázatban* $Y_r2_{,i}$ függvény értékként jelöltük.

Megállapíthatjuk, hogy a regressziós ötödfokú polinom a legnagyobb, $Y_r2_{,max} = r_{fcm}^2{}_{,max}$ értéket ($r_{fcm}^2{}_{,max} = 0{,}9389$) a $C_{opt} = 1{,}66$ helyen veszi fel; és ezen a helyen van az $R_{de\ Vree}$-féle óra-fok szám és a beton f_{cm} nyomószilárdsága közötti összefüggések regressziós egyenese korrelációs együtthatója négyzetének – mint a *20. ábra* adatpontjának – is a legnagyobb értéke ($y_r2_{,max} = r_{fcm}^2{}_{,max} = 0{,}9404$). (Lásd az *5. táblázatot*, valamint a *14. és a 21. ábrát.*)

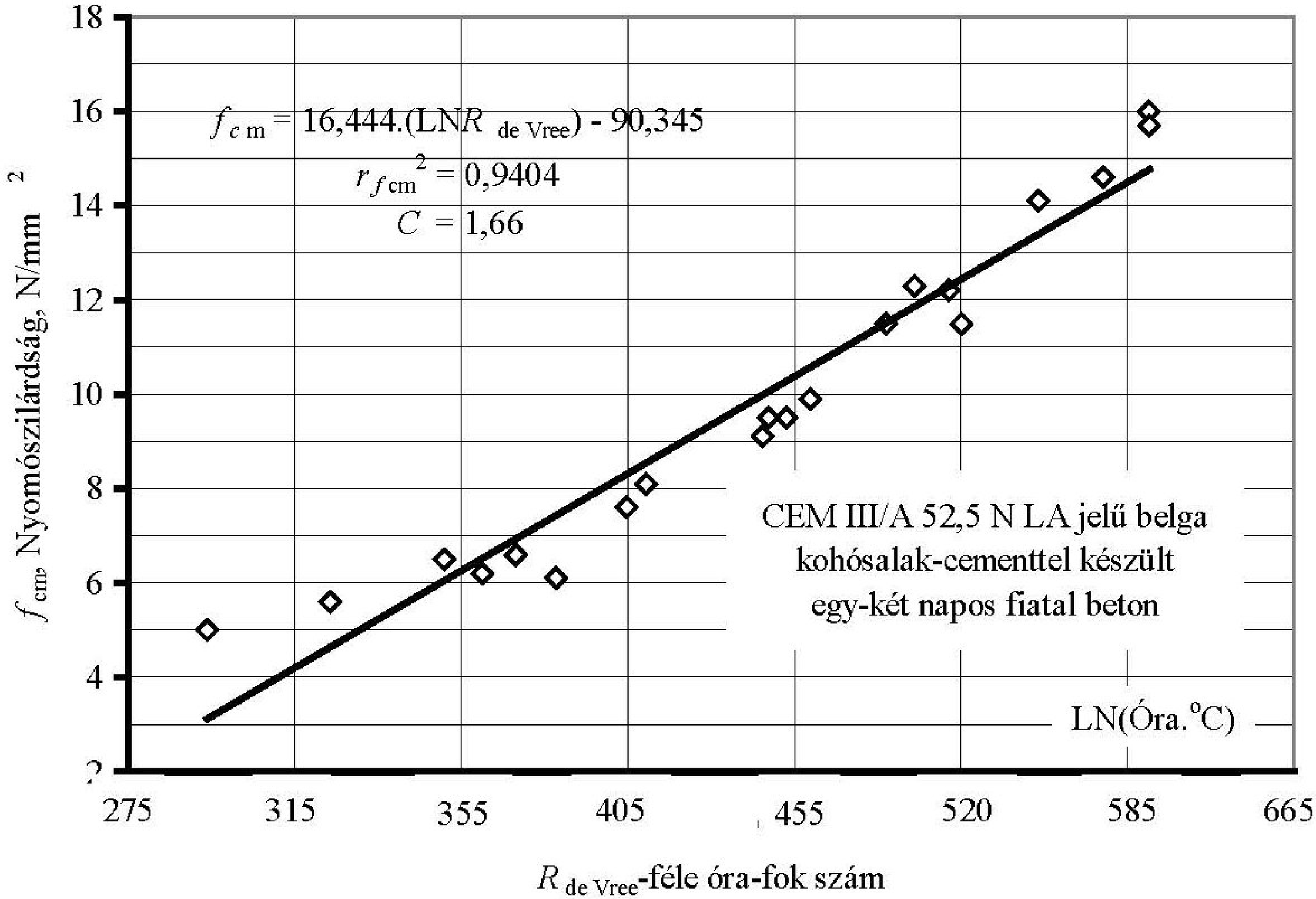
9. *A példa esetén tehát* a beton átlagos nyomószilárdsága (f_{cm}) akkor becsülhető meg a legmegbízhatóbban a *de Vree*-féle óra-fok számból ($R_{de\ Vree}$), ha a számítást a C = 1,66 értékű C tényezővel végezzük. A C = 1,66 tényezőhöz tartozó, a példa esetén érvényes (CEM III/A 52,5 N LA jelű belga kohósalakcementtel készült egy-két napos fiatal beton) $R_{de\ Vree} - f_{cm}$ nyomószilárdság becslő függvény a *21. ábrán* látható.

5. táblázat: A felvett C tényezőkhöz tartozó r^2 korrelációs együttható négyzetek a példa esetén. Lásd a *20. ábrát*. *Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

C tényező	$R_{de\ Vree} - f_{cm}$ regressziós függvény korrelációs együtthatójának négyzete (r^2), például *17. és 21. ábra.* A $C - r_{fcm}{}^2$ koordinátarendszerben (lásd a *20. ábrát*)		C tényező	$R_{de\ Vree} - f_{cm}$ regressziós függvény korrelációs együtthatójának négyzete (r^2), például *17. és 21. ábra.* A $C - r_{fcm}{}^2$ koordinátarendszerben (lásd a *20. ábrát*)	
	adat ($y_r2_{,i}$)	függvény érték ($Y_r2_{,i}$)		adat ($y_r2_{,i}$)	függvény érték ($Y_r2_{,i}$)
1,10	0,3175	0,3180	1,65	0,9404	0,9384
1,15	0,3819	0,3746	**C_{opt}: 1,66**	**0,9404**	**0,9389**
1,20	0,4536	0,4475	1,67	0,9401	0,9389
1,25	0,5308	0,5284	1,70	0,9365	0,9366
1,30	0,6105	0,6110	1,75	0,9236	0,9250
1,35	0,6890	0,6899	1,80	0,9041	0,9056
1,40	0,7619	0,7613	1,85	0,8801	0,8807
1,45	0,8252	0,8222	1,90	0,8534	0,8525
1,50	0,8757	0,8708	1,95	0,8254	0,8236
1,55	0,9116	0,9064	2,00	0,7970	0,7962
1,60	0,9327	0,9287	2,05	0,7690	0,7725



20. ábra: A belga *CRIC-OCCN* kísérleti eredmények értékelése a holland *CEMIJ*-féle módszerrel. A példa szerinti C_{opt} érték meghatározása ötödfokú polinommal. *Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

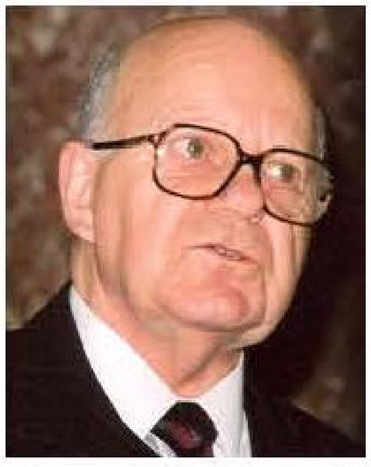


21. ábra: A C = 1,66 tényezőhöz tartozó, a példa esetén érvényes $R_{\text{de Vree}}$ – f_{cm} nyomószilárdság becslő függvény, mint a példa megoldása. *Vermeersch* (2005) diplomamunkája után

A cikk következő része az Arrhenius-féle betonszilárdulási modell tárgyalását, az Összefoglalást, a Jelöléseket és a Hivatkozásokat tartalmazza.

A FIATAL BETON SZILÁRDULÁSI FOLYAMATÁNAK MODELLJEI
SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS
3. RÉSZ: AZ ARRHENIUS-FÉLE MODELL

Vasbetonépítés, 2011. 4. szám. pp. 122-127.



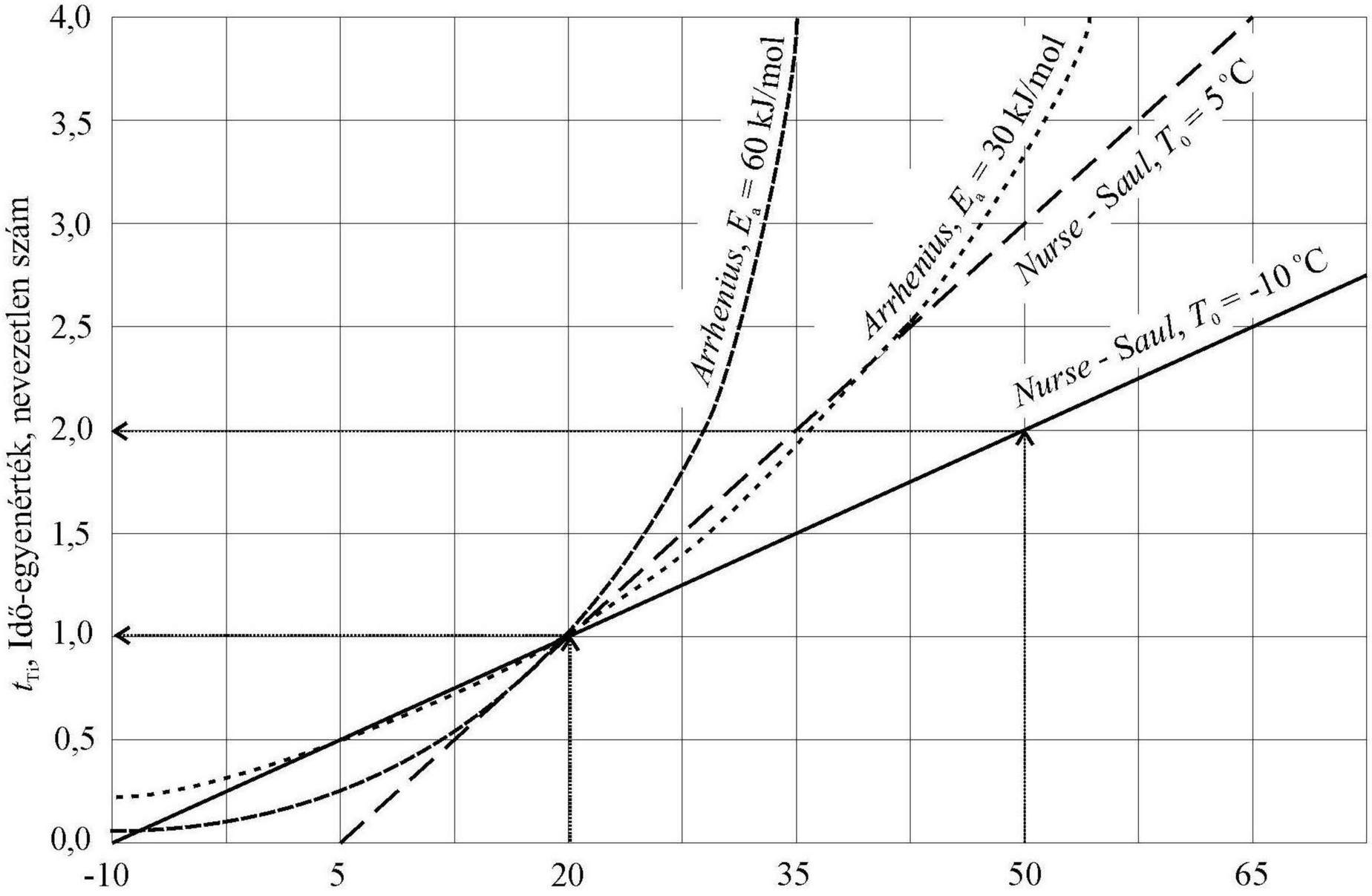
Dr. Kausay Tibor

A cikk 2. része a Vasbetonépítés 2011/3. számában jelent meg.

6. ARRHENIUS-FÉLE BETONSZILÁRDULÁSI MODELL

A *Nurse-Saul*-féle modell a beton szilárdulás becslő módszerek közül a legegyszerűbb, ismereteink szerint a betontechnológiában történetileg az első, de a természettudományokat illetően ez nem mondható el, mert *Arrhenius* (1859-1927) svéd kémiai Nobel-díjas (1903) fizikus és kémikus elmélete korábbi. *Arrhenius* 1888-ban dolgozta ki a tételét, amelyet beton érési-szilárdulási becslő modellként először 1977-ben *Freiesleben* és *Pedersen* alkalmazott. Míg a *Saul*-féle idő-egyenérték összefüggés alakja lineáris, addig az *Arrhenius*-féle összefüggés exponenciális görbét eredményez (*22. ábra*).

A *22. ábrán* a különböző feltételeknek megfelelő *Saul*- és *Arrhenius*-féle idő-egyenérték függvények elhelyezkedését vethetjük össze. A *22. ábra* szerint a $T_0 = 5$ °C alsó hőmérséklettel jellemzett *Nurse-Saul*-féle függvény a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban jó közelítését adja az *MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2)* szabványban is szereplő $E_a = 30{,}0$ kJ/mol jellemzőjű *Arrhenius*-féle függvénynek.



22. ábra: Különböző feltételeknek megfelelő *Saul*- és *Arrhenius*-féle idő-egyenérték függvények összevetése. Forrás: *Report IPRF*, 2006.

Az *Arrhenius*-féle tétel a kémiai kinetikában a *reakció-sebességi együttható* (k) értékét adja meg az anyaghőmérséklet (T) függvényében:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R_u \cdot \Delta T}} = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R_u} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} = A \cdot e^{\frac{E}{R_u} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)} \qquad (10)$$

ahol:

A preexponenciális tényező (frekvencia faktor)

E_a aktiválási energia, J/mol

amely $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 °C) esetén $E_a = 33500$ J/mol

$T < 293{,}15$ K (< 20 °C) esetén $E_a = 33500 + 1470 \cdot (T_0 - T)$ J/mol

vagy a cementfajta függvényében:

CEM I esetén: $E_A = 25000\text{-}45000$ J/mol

CEM III esetén: $E_A = 50000\text{-}75000$ J/mol

R_u univerzális gázállandó (8,3142 J/mol·K)

$E_a/R_u = 33500/8{,}3142 = 4029$ K ~ 4000 K, ha $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 °C)

$E_a/R_u = (33500 + 1470 \cdot 20)/8{,}3142 = 7565$ K, ha $T = 273{,}15$ K (0,0 °C)

T_0 az anyag referencia-hőmérséklete (293,15 K = 20 °C), kelvinben kifejezve

T az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan anyaghőmérséklet vagy átlagos anyaghőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), (273,15 K + T_i = 0,0 °C + T_i), kelvinben kifejezve

T_i az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan anyaghőmérséklet vagy átlagos anyaghőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), °C-ban kifejezve

A (10) szerinti *Arrhenius*-féle összefüggés megtalálható ASTM C 1074-04 szabvány 6.3 fejezetében, és az E_a/R állandót a szabvány A1.3 melléklete (Annex A1.3), valamint X1.3 függeléke (Appendix X1.3) értelmezi.

Ha a vizsgálati anyag hőmérséklete (itt már nevezhetjük betonhőmérsékletnek) $T \geq 293{,}15$ K (≥ 20 °C), akkor az *Arrhenius*-féle formula a CEB-FIP Model Code 1990 szerint a következő alakot ölti:

$$k = A \cdot e^{\frac{E}{R}\cdot\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)} = A \cdot e^{4000\cdot\left(\frac{1}{293{,}15}-\frac{1}{273{,}15+T_i}\right)} = A \cdot e^{\left(13{,}65-\frac{4000}{273{,}15+T_i}\right)} \qquad (11)$$

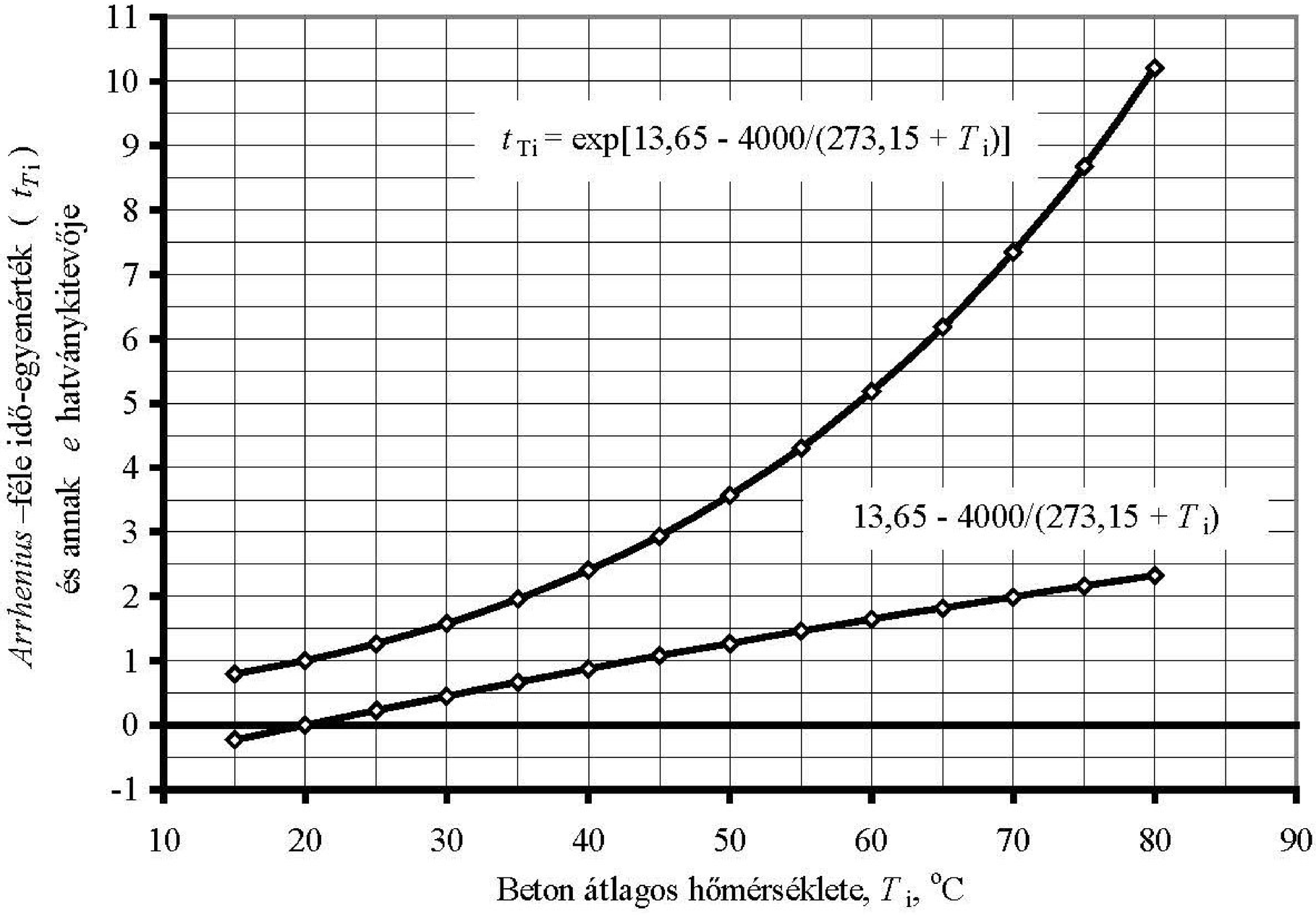
Az *Arrhenius*-féle formulában a k/A hányados az *idő-egyenértéket* ($t_{T\mathrm{i}}$) fejezi ki, amelynek összefüggése – ha a vizsgálati anyag hőmérséklete ≥ 20 °C – a következő, és amely $T_\mathrm{i} = 20$ °C vizsgálati anyaghőmérsékleten $t_{T\mathrm{i}} = t_{20^\circ\mathrm{C}} = 1{,}0$ értéket vesz fel (*23. ábra*):

$$\frac{k}{A} = t_{T_i} = e^{\left(13{,}65-\frac{4000}{273{,}15+T_i}\right)} \quad [\textit{nevezetlen szám}] \qquad (12)$$

Meg kell jegyezni, hogy az *Arrhenius*-féle (11) és (12) jelű összefüggést a szabványok olykor 20 °C alatti hőmérsékleten is alkalmazzák, illetve nem tiltják (például: CEB-FIP Model Code 1990; MSZ EN 1992-1-1:2010; ASTM C 1074-04), és ezért a *6. táblázatban* és a *23. ábrán* az idő-egyenértéket $T_\mathrm{i} = 15$ °C átlagos beton hőmérséklet esetére is megadtuk.

6. táblázat: Példa *a* $t_{T\mathrm{i}}$ idő-egyenérték számítására a (12) összefüggés alapján, feltételezve, hogy a hőmérséklet $T_\mathrm{i} \geq 15$ °C (*23. ábra*)

T_i a beton átlagos hőmérséklete egy napon át °C	*e* hatványkitevője a $t_{T\mathrm{i}}$ idő-egyenérték összefüggésben	$t_{T\mathrm{i}}$ idő-egyenérték (20 °C hőmérsékletű napra vonatkoztatva, az *e* hatványa)
15	-0,232	0,793
20	0,000	1,000
25	0,234	1,264
30	0,455	1,577
35	0,669	1,953
40	0,877	2,403
45	1,077	2,937
50	1,272	3,567
55	1,460	4,308
60	1,643	5,173
65	1,821	6,178
70	1,993	7,340
75	2,161	8,677
80	2,323	10,210



23. ábra: *Arrhenius*–féle idő-egyenérték (t_{Ti}) összefüggés és abban az *e* hatványkitevője a hőmérséklet függvényében

A 20 °C betonhőmérsékletre vonatkoztatott **helyettesítő időtartam az** *Arrhenius*–**féle összefüggés alapján**, portlandcement esetén:

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} t_{T_i} \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^{n} e^{\left(13{,}65 - \frac{4000}{273+T_i}\right)} \cdot \Delta t_i \quad [nap\ vagy\ óra] \tag{13}$$

ahol:

T_i az adott szilárdulási időtartam alatt változatlan betonhőmérséklet vagy átlagos betonhőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), °C-ban kifejezve

Δt_i a szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan vagy átlagával jellemezhető (T_i), napban vagy órában kifejezve

A helyettesítő időtartam számítására a (13) *Arrhenius*–féle összefüggés alapján a *7. táblázatban* mutatunk be példát.

Minthogy az eredeti *Saul*-féle formula alkalmazása 20 °C hőmérséklet felett ellentmondásokra vezet (*20. ábra*), a *CEB-FIP Model Code 1990* kidolgozói a szabályozásba az *Arrhenius*-féle törvényt emelték be. A (13) összefüggést *CEB-FIP Model Code 1990* nyomán az *MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2)* szabvány is tartalmazza. A (13) *Arrhenius*–féle helyettesítő időtartam összefüggés számjele a *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.8.2. fejezetében: (2.1-87), és az *MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2)* szabvány B.1 mellékletében: (B.10).

Az európai szabványok a t_T helyettesítő időtartam összefüggést a 28 napnál fiatalabb szabványosan érlelt és az előregyártott, hőérlelt beton szilárdság becsléséhez 0-80 °C hőmérsékleti tartományban alkalmazzák (*CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.8. fejezete és *MSZ EN 1992-1-1:2010* szabvány B.1 mellékletének (3) bekezdése).

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. és 2.1.8.2. fejezete, valamint D. függelékének d.4.2.1. szakasza szerint a (13) összefüggés lényegében a mai értelemben vett CEM I és CEM II típusú portlandcementek esetén használható. (Ezek jele a modell-kódban CE I és CE II volt, a CE II heterogén portlandcement összetétele a maitól bizonyos mértékig eltért, a mai CEM V típusú kompozitcement nem volt szabványos.) Ettől a korlátozástól az *MSZ EN 1992-1-1:2010* (Eurocode 2) szabvány 3.1.2 fejezetének (6) bekezdése érdemben nem tér el. (Lásd a *8. táblázatot.*)

7. táblázat: Példa a helyettesítő időtartam számítására a (13) *Arrhenius*–féle összefüggés alapján

Érlelési idő, óra	Mért hőmérséklet, °C	Δt_i, óra	Átlagos hőmérséklet, T_i, °C	Idő-egyenérték, t_{Ti}	Helyettesítő időtartam, t_T, óra
0,5 1,0	20 21	0,5 0,5	20,5	1,029	1,03
1,5 2,0	22 23	0,5 0,5	22,5	1,128	2,16
2,5 3,0	24 25	0,5 0,5	24,5	1,235	3,39
3,5 4,0	27 28	0,5 0,5	27,5	1,413	4,80
4,5 5,0	29 30	0,5 0,5	29,5	1,543	6,35
5,5 6,0	31 32	0,5 0,5	31,5	1,682	8,03
6,5 7,0	33 33	0,5 0,5	33,0	1,794	9,82
7,5 8,0	34 34	0,5 0,5	34,0	1,872	11,70
8,5 9,0	35 35	0,5 0,5	35,0	1,953	13,65
9,5 10,0	36 36	0,5 0,5	36,0	2,037	15,69
10,5 11,0	36 37	0,5 0,5	36,5	2,080	17,77
11,5 12,0	37 37	0,5 0,5	37,0	2,123	19,89

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezetének (2.1-54) összefüggése a 28 naposnál fiatalabb beton szilárdsági tulajdonságainak változását – a 28 napos korú, szabványosan tárolt és utókezelt (MSZ EN 12390-2:2009) beton átlagos nyomószilárdságára vonatkoztatva – az idő függvényében a β_{cc}**(t) szilárdulási idő tényezővel** veszi figyelembe:

$$\beta_{cc}(t) = exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t_T / t_{1,T}} \right)^{1/2} \right] \right\} = e^{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t_T / t_{1,T}} \right)^{1/2} \right]} \qquad (14)$$

ahol:

s cement fajtájától függő tényező, lásd a *8. táblázatot*

t_T a (13) összefüggés szerinti helyettesítő időtartam, napban kifejezve

$t_{1,T}$ 1 nap, a mértékegységre tekintettel szerepeltetik az összefüggésben.

Eszerint a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényező a hőmérséklet befolyásolta helyettesítő időtartamnak (t_T) és a cement fajtájától függő együtthatónak (s) a függvénye (*24. ábra*).

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezete szerint a (14) összefüggés az ISO 2736-2:1986 szerint szabványosan készített és tárolt (20 ± 2 °C hőmérsékleten, kizsaluzás után vízben vagy legalább 95 % relatív nedvességtartalmú laboratóriumi körülmények között úgy, hogy a vizsgálatig a próbatestek felületét állandóan vízfilm vonja be) próbatestek esetén érvényes. (Az ISO 2736-2:1986 szabványt visszavonták, az ISO 1920-3:2004 szabvány váltotta fel, mai európai megfelelője az MSZ EN 12390-2:2009 szabvány.)

Alkalmazva a $t = t_T/t_1$ egyszerűsítést, a CEB-FIP Model Code 1990 modell-kódból átvett (14) összefüggés az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezetének (6) bekezdésében – (3.2) jel alatt – a következő alakot ölti, és ugyancsak a 28 napos korú, szabványosan tárolt és utókezelt *beton átlagos nyomószilárdságára vonatkoztatva* az idő függvényében a $\beta_{cc}(t)$ *szilárdulási idő tényezőt* adja meg:

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} = e^{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right]} \qquad (15)$$

A (15) összefüggésben a t betonkor a (13) összefüggés szerinti t_T helyettesítő időtartam.

A (15) összefüggés az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 10.3.1.1 fejezetének (3) bekezdése szerint az előregyártott vasbeton szerkezeti elemek hőérlelése esetén is érvényes, ha a beton 28 napnál fiatalabb. Megjegyzik, hogy ebben az esetben a $\beta_{cc}(t)$ tényezőt általában 1,0-ra kell korlátozni. Ez azt jelenti, hogy a (15) jelű összefüggés hőérlelt betonok esetén is akkor alkalmazható, ha azok 28 napnál fiatalabbak (*24. ábra*).

Kanstad – Hammer – Bjøntegaard – Sellevold (1999) a korai szilárdulási folyamat jobb leírására a (15) összefüggést a következőképpen módosította, és a *húzó-szilárdság*, valamint a *rugalmassági modulus* alakulásának kifejezésére is alkalmazta (*Röhling*, 2009 és *Atrushi*, 2003):

$$\beta_{cc}(t) = exp\left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28 - t_0}{t - t_0} \right)^{c} \right] \right\} \qquad (16)$$

ahol:

t_0 a hőfejlődés és a szilárdulás kezdetének a cementfajtától és a beton összetételétől függő időpontja

c kísérletekkel meghatározandó függvényállandó

A t_0 időpont figyelembevétele főként akkor előnyös, ha a kötéskésleltető adalékszernek a hatását, vagy a hidratáció első néhány óráját jellemző pangó szakasznak (németül: dormante Periode) a hatását nem kívánjuk elhanyagolni. A pangó szakasz a kezdetleges trikalcium-aluminát-szulfát hidratáció (az elsődleges ettringit képződés kezdetének) ideje, amely szakasz a kalcium-szilikát-hidrát fázisok képződésének kezdetéig, lényegében nem egészen a *Vicat*-féle kötésidő végéig tart. Ezalatt a beton már nem tömöríthető, de még nem is szilárd.

8. táblázat: A cement fajtájától függő tényező (s) értéke a (15) – (17) összefüggésben

CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód 2.1.6.1. fejezete és az
MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány
3.1.2 fejezetének (6) bekezdése szerint

s	ha a cement fajtája
0,20	CEM 42,5 R; CEM 52,5 N; CEM 52,5 R [a)]
0,25	CEM 32,5 R; CEM 42,5 N [b)]
0,38	CEM 32,5 N [c)]

Megjegyzés:

A *CEB-FIP Model Code 1990* modell-kód 2.1.6.1. fejezete és d.4.2.1 függeléke az

a) szerinti cementek csoportját *RS* osztályú, gyorsan szilárduló és nagyszilárdságú (rapid hardening high strength cements), akkori jelöléssel CE 52,5;

b) szerinti cementek csoportját *R* osztályú, gyorsan szilárduló (rapid hardening cements), akkori jelöléssel CE 42,5 R, és *N* osztályú, normál módon szilárduló (normal hardening cements), akkori jelöléssel CE 32,5 R és CE 42,5;

c) szerinti cementek csoportját *SL* osztályú, lassan szilárduló (slowly hardening cements), akkori jelöléssel CE 32,5 cementnek nevezi;

MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2 fejezetének (6) bekezdése az

a) szerinti cementek csoportját *R* osztályú,

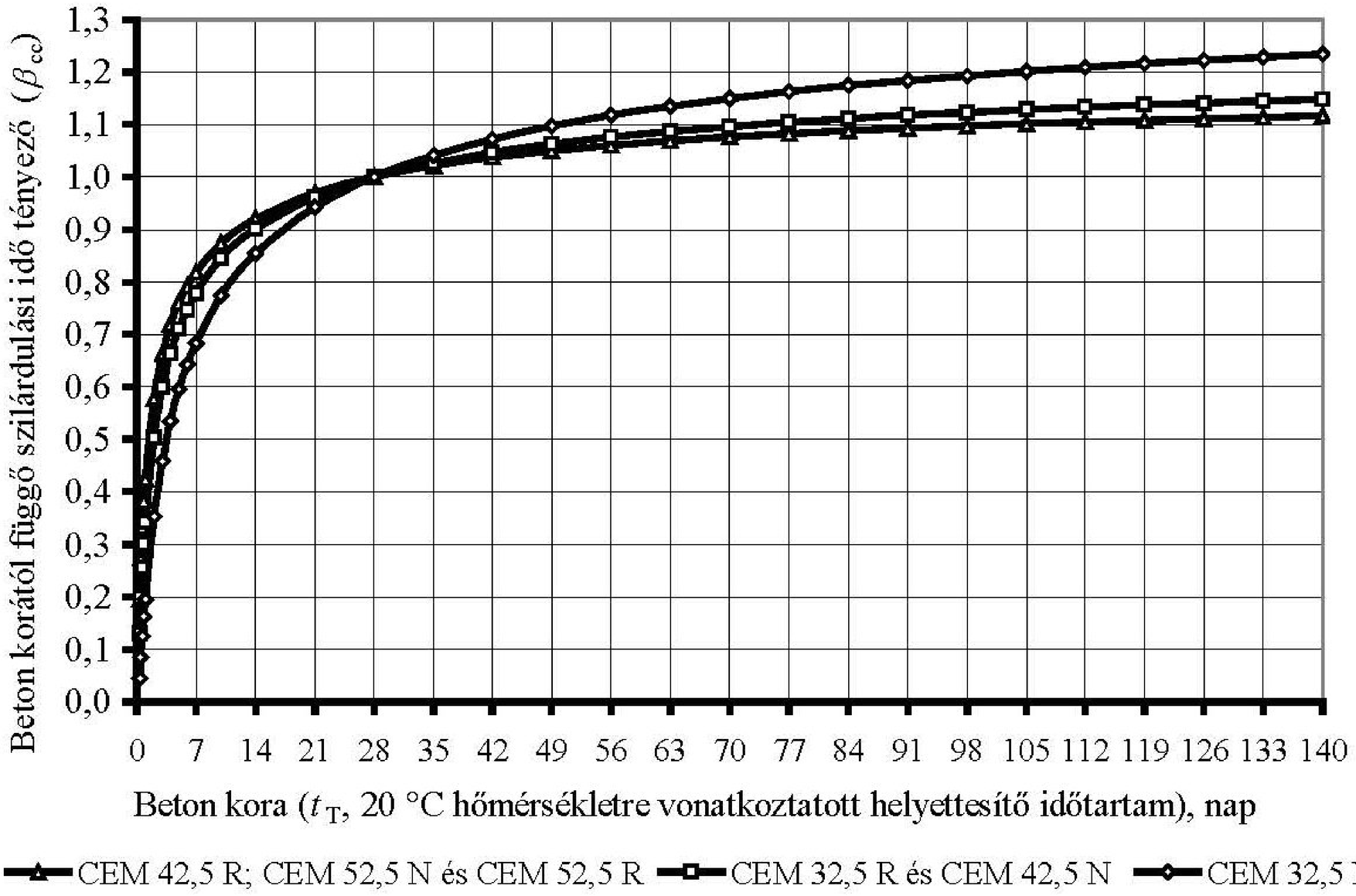
b) szerinti cementek csoportját *N* osztályú,

c) szerinti cementek csoportját *S* osztályú cementnek nevezi.

Ezek a betűjelek nem tévesztendők össze az MSZ EN 197-1:2000 cement-szabvány szerinti betűjelekkel.

Rostasy – Krauß – Budelmann (2002) szerint, lásd *Röhling* (2009)

s	ha a cement fajtája
0,17 – 0,22	CEM I 52,5 (C60/75 osztályú betonok)
0,20 – 0,23	CEM I 42,5 R (C40/50 osztályú betonok)
0,28 – 0,45	CEM III/B 32,5 NW, kis hőfejlesztésű kohósalakcement (C40/50 osztályú betonok)



24. ábra: $\beta_{cc}(t)$, szilárdulási idő tényező függvénye

A (14) és (15) összefüggés a CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód és az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány szerint 20 °C átlagos hőmérsékletre vonatkoztatva és az MSZ EN 12390-2:2009 szerinti utókezelés esetén érvényes. Az MSZ EN 12390-2:2009 szabvány 5.5. fejezetében a próbatestek utókezeléséről (tárolásáról) a következőket olvashatjuk: a próbatesteket legalább 16 órán át, de 3 napnál nem hosszabb ideig – védve ütéstől, rázástól, vízvesztéstől – a sablonban, (20 ± 5) ºC hőmérsékletű térben kell tárolni. A próbatesteket a sablonból kivéve közvetlenül a vizsgálatig (20 ± 2) ºC hőmérsékletű vízben vagy (20 ± 2) ºC hőmérsékletű és legalább 95 %-os relatív páratartalmú klímakamrában kell tárolni.

A CEB-FIP Model Code 1990 modell-kód 2.1.6.1. fejezetének (2.1-53) összefüggése és az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezete (6) bekezdésének (3.1.) összefüggése szerint a 28 naposnál fiatalabb beton átlagos nyomószilárdságát a t időpontban – a szilárdulási idő tényező $\beta_{cc}(t)$ és a beton 28 napos átlagos nyomószilárdsága (f_{cm}) felhasználásával – a következő összefüggéssel lehet megbecsülni:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} = e^{s\left[1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}\right]} \cdot f_{cm} \qquad (17)$$

Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 3.1.2. fejezete (6) bekezdésben kihangsúlyozzák, hogy *ha a beton 28 napos megkövetelt nyomószilárdsága nem teljesül, akkor a (15) és (17) alatti összefüggést használni, továbbá ezekkel a nem megfelelő referencia-szilárdság meglétét visszamenőlegesen, az utószilárdulás figyelembevételével igazolni nem szabad.*

Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány 10.3.1.1 fejezetének (3) bekezdése szerint a 28 naposnál fiatalabb (t < 28 napos*) hőérlelt előregyártott vasbeton szerkezeti elem* betonjának $f_{cm}(t)$ nyomószilárdsága ugyancsak a (17) jelű összefüggéssel számítható, amely összefüggésben a t a hőmérséklettel módosított (13) szerinti t_T betonkor.

Példaképpen – MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány szerinti (17) összefüggés, valamint az *5. és 8. táblázat* alapján – a *9. táblázatban* mutatjuk be annak a CEM 32,5 N jelű

cementtel készítendő betonnak a kizsaluzhatósági ideje számítását, amelytől megköveteljük, hogy a teherhordó zsaluzat eltávolításának időpontjában a beton nyomószilárdsága érje el a 28 napos nyomószilárdság 80 %-át. A betonozás tervezésének idején felkészülünk arra, hogy a fiatal beton átlagos hőmérséklete a kizsaluzásig – az időjárástól függően, és az egyszerűség kedvéért – például 15 °C vagy 20 °C vagy 25 °C lesz.

$$\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} = \beta_{cc}(t) = 0{,}8 = e^{s\cdot\left[1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}\right]}$$

$$\frac{ln0{,}8}{s} = \frac{-0{,}2231435}{0{,}38} = -0{,}5872198 = 1-\left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}$$

$$\frac{28}{t_T} = 1{,}5872198^2 = 2{,}5192667$$

$t_T = 11{,}114345$ nap, helyettesítő idő (13) szerint

9. táblázat: Példa a kizsaluzhatóság időpontjának kiszámítására

T Beton átlagos hőmérséklete a készítéstől a kizsaluzásig °C	t_{Ti} Idő-egyenérték az *5. táblázatból*	$\Delta t_{kizsaluzási} = t_T/t_{Ti}$ Kizsaluzhatóság időpontja Nap
15	0,793	14,0
20	1,000	11,1
25	1,264	8,8

Tehát a példa szerinti beton 15 °C átlagos hőmérséklet esetén 14 napos, 20 °C átlagos hőmérséklet esetén 11 napos, illetve 25 °C átlagos hőmérséklet esetén 9 napos korban zsaluzható ki. Arról természetesen meg kell győződni, hogy az adott nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori nyomószilárdságának 80 %-a a teherbírás szempontjából kizsaluzáskor elegendő-e. Így például

- a C20/25 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0,8 \cdot 1,4 \cdot (20+8) = 31,4$ N/mm^2;
- a C25/30 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0,8 \cdot 1,4 \cdot (25+8) = 37,0$ N/mm^2;
- a C30/37 nyomószilárdsági osztályú beton 28 napos kori előírt átlagos nyomószilárdságának 80 %-a vegyesen tárolt 150 mm méretű próbakockán mérve: $0,8 \cdot 1,4 \cdot (30+8) = 42,6$ N/mm^2.

Ha *a betont fiatal korában*, amikor még kicsi a szilárdsága, megterhelik, akkor *a kúszási alakváltozás a rugalmas alakváltozás 3-5-szörösét is kiteheti*. Ilyen esetben a $\varphi(t, t_0)$ kúszási tényezőben szereplő, a beton megterhelésének napban kifejezett t_0 időpontját a cement szilárdulási ütemének figyelembevételével a CEB Bulletin 199:1990 és a CEB-FIP Model Code 1990 szerint a következő összefüggéssel kell kiszámítani:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left[\frac{9}{2 + \left(t_{0,T} / t_{1,T}\right)^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha} \geq 0,5 \; nap \qquad (18)$$

ahol:

$t_{0,T}$ az *Arrhenius*–féle t_T helyettesítő időtartam a (13) alatti összefüggés alapján, a megterhelés időpontjában, napban kifejezve

$t_{1,T}$ 1 nap, amelyet a mértékegységre tekintettel szerepeltetnek az összefüggésben

α = -1 a lassan szilárduló (SL jelű) cement esetén; 0 normál (N jelű) vagy gyorsan (R jelű) szilárduló cement esetén; 1 a gyorsan szilárduló (RS jelű) nagyszilárdságú cement esetén

A (18) szerinti összefüggést az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány a B.9 jel alatt a következő, egyszerűbb formában közli, és a cementek szilárdulását is némiképp módosítva értelmezi:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left[\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha} \geq 0,5 \; nap \qquad (19)$$

ahol:

$t_{0,T}$ az *Arrhenius*–féle t_T helyettesítő időtartam a (13) alatti összefüggés alapján a megterhelés időpontjában, napban kifejezve

α = -1 a lassan szilárduló (S jelű) cement esetén; 0 normál módon szilárduló (N jelű) cement esetén; 1 a gyorsan szilárduló (R jelű) cement esetén

Egyes szabványokban az érési, szilárdulási modell segítségével nem csak a nyomószilárdság, hanem egyéb szilárdsági jellemzők időbeni változásának meghatározásával is foglalkoznak az *Arrhenius*-féle modell alapján.

Így *például az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány*

- 3.1.2 fejezetének (9) bekezdése szerint a *28 naposnál fiatalabb beton tengelyirányú húzószilárdsága* átlag értékének időbeni értéke $f_{ctm}(t)$ a $\beta_{cc}(t)$ szilárdulási idő tényező és a 28 napos beton tengelyirányú húzószilárdsága f_{ctm} átlag értékének függvényében:

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{ctm} = \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \cdot f_{ctm} \qquad [N/mm^2] \tag{20}$$

- 3.1.3 fejezetének (3) bekezdése alatt a *rugalmassági modulus* (E_{cm}) időbeni változásának számítására a következő összefüggés található:

$$E_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)^{0,3} \cdot E_{cm} = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} \qquad [N/mm^2] \tag{21}$$

ahol: E_{cm} a 28 napos korú beton rugalmassági modulusa

Mint már említettük, az ASTM C 1074-04 szabvány 8.7 fejezete a fiatal beton hajlítószilárdságának becslését teszi lehetővé a tárgyalt *Nurse-Saul*-féle és *Arrhenius*-féle helyettesítő időtartam meghatározásával.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A hőmérsékletnek a fiatal beton szilárdságára gyakorolt hatása a mintegy 20 °C hőmérsékletű beton szilárdulási folyamatának első négy hetéből becsülhető meg. Ehhez kísérlettel meg kell határozni a szabványosan tárolt és utókezelt (MSZ EN 12390-2:2009) beton átlagos nyomószilárdságát minél több időpontban, de mindenképpen például 1 vagy 2 napos és 7 vagy 14, legfeljebb 28 napos korban, majd valamelyik számítási módszer (modell) segítségével, logaritmikus interpolálással ki kell számítani a *helyettesítő időtartamot*, illetve a szilárdulási tényezőt, majd az adott időponthoz tartozó, hőmérsékletfüggő nyomószilárdságot, húzószilárdságot, rugalmassági modulust.

A dolgozatban négy modellt és egy optimum számítási módszert ismertettünk. A legegyszerűbb a *Nurse-Saul*-féle modell, de hiányossága, hogy idő-egyenérték összefüggése lineáris és a különböző cementféleségek eltérő hatását az érési óra-fok számra nem veszi figyelembe. *Saul* szerint a beton nyomószilárdsága arányos a betonérési óra-fok szám logaritmusával A *Nurse-Saul*-féle modellt a cement hőérzékenységét kifejező „*A*" tényező bevezetésével *Papadakis* és *Bresson* fejlesztette tovább. A *Papadakis-Bresson*-féle modell hátránya, hogy csak 20 °C hőmérséklet felett használható. A *Papadakis-Bresson*-féle modellt *de Vree* alakította át úgy, hogy 20 °C hőmérséklet alatt is használható legyen. Ehhez bevezetett egy új, cement hőérzékenységet kifejező „*C*" tényezőt, miáltal a *de Vree*-féle modell – a *Nurse-Saul*-féle modellhez hasonlóan – -10 °C hőmérsékletig alkalmazható. *De Vree* szerint a beton nyomószilárdsága a korrigált betonérési óra-fok szám természetes alapú logaritmusával arányos. Hollandiában a *de Vree*-féle óra-fok szám meghatározására mérőműszert fejlesztettek

ki. A *CEMIJ*-féle módszert a legjobb nyomószilárdság becslésre vezető *de Vree*-féle „$C_{\text{optimális}}$" tényező meghatározására dolgozták ki. Legtöbb kísérleti munkával jár, de épp ezért nagyobb biztonsággal becsülhető meg a fiatal beton nyomószilárdsága a *de Vree*-féle modellre épülő *CEMIJ*-féle számítási módszerrel.*Arrhenius* kémiai kinetikai tételét beton érési-szilárdulási becslő modellként először *Freiesleben* és *Pedersen* alkalmazta. Az *Arrhenius*-féle összefüggés exponenciális görbét eredményez, az *Arrhenius*-féle modell a 28 napnál fiatalabb szabványosan érlelt és az előregyártott, hőérlelt beton szilárdság becsléséhez 0-80 °C hőmérsékleti tartományban alkalmazható. Az *Arrhenius*-féle modell a (10 – 35) °C hőmérsékleti tartományban az 5 °C alsó hőmérséklethez tartozó *Nurse-Saul*-féle függvénnyel jól közelíthető.

Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabvány a *beton szilárdulási tényezőjének* összefüggését az *Arrhenius*-féle modell alapján adja meg. Az ASTM C 1074-04 szabványban két módszert írnak le, ezek egyike a *Nurse-Saul*-féle modell, másika az *Arrhenius*-féle modell. A *de Vree*-féle betonérési fok, illetve szilárdság becslési módszer leírását a holland NEN 5970:2001 szabvány tartalmazza. A betonérési fok vizsgálatát a módszer megnevezése és részletek ismertetése nélkül az *állványzat eltávolíthatósága* és a *beton kizsaluzhatósága* idejének meghatározására a DIN 1045-3:2008 szabvány, a kúszás számításához az első terhelés időpontjához tartozó betonérési fok meghatározására a DIN-Fachbericht 102:2009 jelentés ajánlja.

A dolgozat ismerteti az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) szabványban megadott összefüggések elméleti alapjait, és ezzel segíti a tervezőt a kivitelezés során rendre felmerülő kérdéseknek – úgymint a kizsaluzhatóság és a feszítőerő ráengedés lehetséges időpontjának, a beton korai állapotában fellépő hidratációs húzóerőknek (acélbetét mennyiségnek) a meghatározása – megválaszolásában.

8. JELÖLÉSEK

A	Preexponenciális tényező (frekvencia faktor)
c	Kísérletekkel meghatározandó függvényállandó a (16) összefüggésben
C	Cement hőérzékenységét kifejező *de Vree*-féle tényező
E_a	Aktiválási energia, J/mol
E_{cm}	28 napos korú beton rugalmassági modulusa
i	Szilárdulási időtartam (intervallum) sorszáma, i = 1, 2, 3…n
r_i	Adott szilárdulási időtartam (óra) alatt változatlan „javított cementfüggő" betonhőmérséklet, °C-ban kifejezve
R	Beton érését (hidratáció előrehaladtát) kifejező idő-fok (óra-fok vagy nap-fok) szám (németül: Reife), mint a gőzölt beton gőzölési idő-hőmérséklet diagramja alatti terület nagysága
$R_{\text{de Vree}}$	Beton érését (a hidratáció előrehaladtát) kifejező „javított cementfüggő" óra-fok szám *de Vree* szerint
R_u	Univerzális gázállandó (8,3142 J/mol·K)
s	Cement fajtájától függő tényező
t_0	Hőfejlődés és a szilárdulás kezdetének a cementfajtától és a beton összetételétől függő időpontja
$t_{0,T}$	*Arrhenius*–féle t_T helyettesítő időtartam a beton megterhelésének időpontjában, napban kifejezve
$t_{1,T}$	1 nap, amelyet a mértékegységre tekintettel szerepeltetnek az összefüggésben
t_T	Helyettesítő időtartam, napban kifejezve
T	Adott szilárdulási időtartam alatt változatlan anyaghőmérséklet vagy átlagos anyaghőmérséklet (vizsgálati hőmérséklet), kelvinben kifejezve
T_0	Anyag referencia-hőmérséklete, kelvinben kifejezve
T_i	Beton egy órai vagy napi átlaghőmérséklete vagy változatlan hőmérséklete a szilárdulási időtartam (intervallum) alatt, °C-ban kifejezve

α Cement fajtájától függő tényező

Δt_i Szilárdulási időtartam (intervallum), amely alatt a hőmérséklet változatlan vagy átlagával jellemezhető (T_i), napban vagy órában kifejezve

$\beta_{cc}(t)$ Szilárdulási idő tényező

9. HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK ÉS JELENTÉSEK

ASTM C 1074-04 „Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", 2004; A szabvány korábbi változata 1993-ban, illetve 1998-ban jelent meg „Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method" címmel

CEB Bulletin 199:1990 „Evaluation of the time dependent behaviour of concrete"

CEB-FIP Model Code 1990 Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information No. 203-205, Final Draft, Chapters 4-10, Lausanne 1991; First published by Thomas Telford Services Ltd., London, 1993.

DIN 1045-3:2008 (és :2001) „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 3: Bauausführung"

DIN 4227:1988 „Spannbeton. Teil 1: Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung"

DIN-Fachbericht 102:2009 „Betonbrücken"

EN 197-1:2000 „Cement. 1. rész: Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei". Módosítások: MSZ EN 197-1:2000/A1:2004 és MSZ EN 197-1:2000/A3:2007

ISO 1920-3:2004 „Testing of concrete. Part 3: Making and curing test specimens"

ISO 2736-2:1986 „Concrete tests. Test specimens. Part 2: Making and curing of test specimens for strength tests". Visszavonva, felváltotta az ISO 1920-3:2004 szabvány. (Honosított változata: MSZ ISO 2736-2:1991 „Betonvizsgálati próbatestek. Próbatestek készítése és kezelése szilárdságvizsgálati célra". Visszavonva: 2001. november 1.)

MSZ EN 12390-2:2009 „A megszilárdult beton vizsgálata. 2. rész: Szilárdságvizsgálati próbatestek készítése és tárolása"

MSZ EN 1992-1-1:2010 Eurocode 2: „Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok"

MSZ EN 206-1:2002 „Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség". Módosítások: MSZ EN 206-1:2000/A1:2004 és MSZ EN 206-1:2000/A2:2005

NEN 5970:2001 „Bepaling van de druksterkte-ontwikkeling van jong beton op basis van de gewogen rijpheid", holland szabvány

Report IPRF-01-G-002-03-6 „Using Maturity Testing for Airfield Concrete Pavement Construction and Repair", An Research Report IPRF. Innovative Pavement Research Foundation. Airport Concrete Pavement Technology Program. Skokie (USA, Illinois) 2006.

10. HIVATKOZÁSOK

Arrhenius, S.:„On the Reaction Velocity of the Inversion of Cane Sugar by Acids" *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, No. 4, 1889, pp. 226-232 (as translated and published in Margaret H. Back and Keith J. Laidler, 1967, „Selected Readings in Chemical Kinetics" *Pergamon*, Oxford, 1967).

Atrushi, D. S.: „Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling", Doctoral Thesis. Trondheim, Norway, 2003

Bergmeister, K. – Wörner, J.-D. – Fingerloos, F.: „Konstruktiver Hochbau, Aktuelle Massivbaunormen", Beton-Kalender 2009, Teil I. pp. 54-56. és 64-65., Jahrgang 98., *Ernst & Sohn*, Berlin, 2009.

Beton-Kalender 1991: Schriftleitung J. Eibl, Karlsruhe, Teil II, pp. 263, Jahrgang 80., *Ernst & Sohn*, Berlin, 1991.

Braasch, T.: „Herabsetzung des Risikos einer Rissbildung abschnittsweise hergestellter Brückenüberbauten aus Beton", Dissertation, Hameln, Juni 2004.

Bunke, N. (szerkesztette): „Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweis als Ergänzung zu DIN 1048", DAfStb, Heft 422, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin-Köln, 1991.

Egmond, van, B. – Jacobs, F.: „Gewichtete Reife des Betons", *TFB Cementbulletin*, Jg. 67., 1999., H. 11. pp. 1-7.

Freiesleben Hansen, P. – Pedersen, E. J.: „Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete", *Nordisk Betong*, 1, 1977, pp. 19-34.

Goris, A. – Hegger, J.: „Stahlbetonbau aktuell 2010, Praxishandbuch", *Bauwerk Verlag GmbH*, Berlin, 2010.

Iken, H.-W. – Lackner, R. R. – Zimmer, U. P. – Wöhnl, U.: „Handbuch der Betonprüfung. Anleitungen und Beispiele", *Verlag Bau+Technik*, Düsseldorf, 2003.

Iványi Gy. (szerkesztette): „Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton", DAfStb, Heft 555, *Beuth Verlag GmbH*, Berlin-Köln, 2006.

Kanstad, T. – Hammer, T. A. – Bjøntegaard, Ø. – Sellevold, E. J.: „Mechanical properties of young concrete: Evaluation of test methods for tensile strength and modulus of elasticity. Determination of model parameters", Nor-Ipacs report STF22. *Norwegian Inst. of Techn.*, Trondheim, 1999.

Madaleno, A. C. L.: „Erfassung von Verformungs- und Spannungszuständen im jungen Beton infolge Temperetur", doktori értekezés, Bauhaus – *Universität Weimar*, 2002.

Papadakis, M. – Bresson, J.: „Contribution à l'ètude du facteur de maturité des liants hydrauliques application à l'industrie du béton manufacturé", *Revue des Matériaux, Ciments – Betons*, Nr. 678, 3/1973, pp. 18-22.

Rostasy, F. S. – Krauß, M. – Budelmann, H.: „Planungswerkzeug zur Kontrolle der frühen Rißbildung in massigen Betonbauteilen", *Bautechnik*, 79, 2002, H. 7. – H. 12.

Röhling, S.: „Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme", *Verlag Bau+Technik GmbH*, Düsseldorf, 2009

Saul, A. G. A.: „Principles underlaying the steam curing of concrete at atmospheric pressure", *Magazine of Concrete Research*, 1951, No. 6., pp. 127-140.

Schießl, P.: „Hydratationswärme und Festigkeitsentwicklung", *Technische Universität München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung* (Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schießl), München, 2003. http://www.cbm.bv.tum.de/english /images/Lehre/Skripten/BauingeniuerwesenMaster/hydratationswaerme%2Bfestigkeitsent wicklung.pdf

Tegelaar, R.: „Steuerung der Wärmebehandlung auf Basis der Betonreife", *BFT Betonwerk + Fertigteil-Technik*, Jg. 68., 2002., H. 4. pp. 30-37.

Vereniging Nederlandse Cementindustrie: „Gewogen rijpheid", *Betoniek*, 6/20, 1984.

Vermeersch, T.: Semi-automatische bepaling van de ontkistingssterkte toegepast op het productieproces van Prefadim Belgium NV. Diplomamunka. *Katholieke Hogeschool Brugge – Oostende*, 2005.

Vree, de, R. T. – Tegelaar, R. A.: „Gewichtete Reife des Betons", *beton*, Jg. 48., 1998. H. 11. pp. 674-678.

Weigler, H. – Karl, S.: „Junger Beton, Beanspruchung – Festigkeit – Verformung", *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, 1974. Heft 6. pp. 392-401., és Heft 7. pp. 481-484.

Wierig, H. J.: „Die Warmbehandlung von Beton", Zement-Taschenbuch. *Bauverlag*, Wiesbaden und Berlin, 1970/71., pp. 203-236.

„Zement-Taschenbuch" vdz. Verein Deutscher Zementwerke e.V. 51. Ausgabe. *Verlag Bau+Technik GmbH.*, Düsseldorf, 2008., 5.4.1. fejezet, pp. 329-332.

Zilch, K. – Diederichs, C. J. – Katzenbach, R.: „Handbuch für Bauingenieure", *Spinger Verlag*, Berlin – Heidelberg – New York, 2001.

Dr. Kausay Tibor (1934) okl. építőmérnök (1961), vasbetonépítési szakmérnök (1967), egyetemi doktor (1969), a műszaki tudomány kandidátusa (1978), Ph.D. (1997), címzetes egyetemi docens (1985), címzetes egyetemi tanár a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken (2003). A *fib* Magyar Tagozat tagja (2000). Az MTA Szabolcs-Szatmár-Bereg Megyei Tudományos Testületének gróf Lónyay Menyhért emlékérmes tiszteletbeli tagja (2003). Tevékenysége a betontechnológiai és a kő- és kavicsipari kutatásra, fejlesztésre, szakértésre, oktatásra, szabványosításra terjed ki. Publikációinak száma mintegy 175.

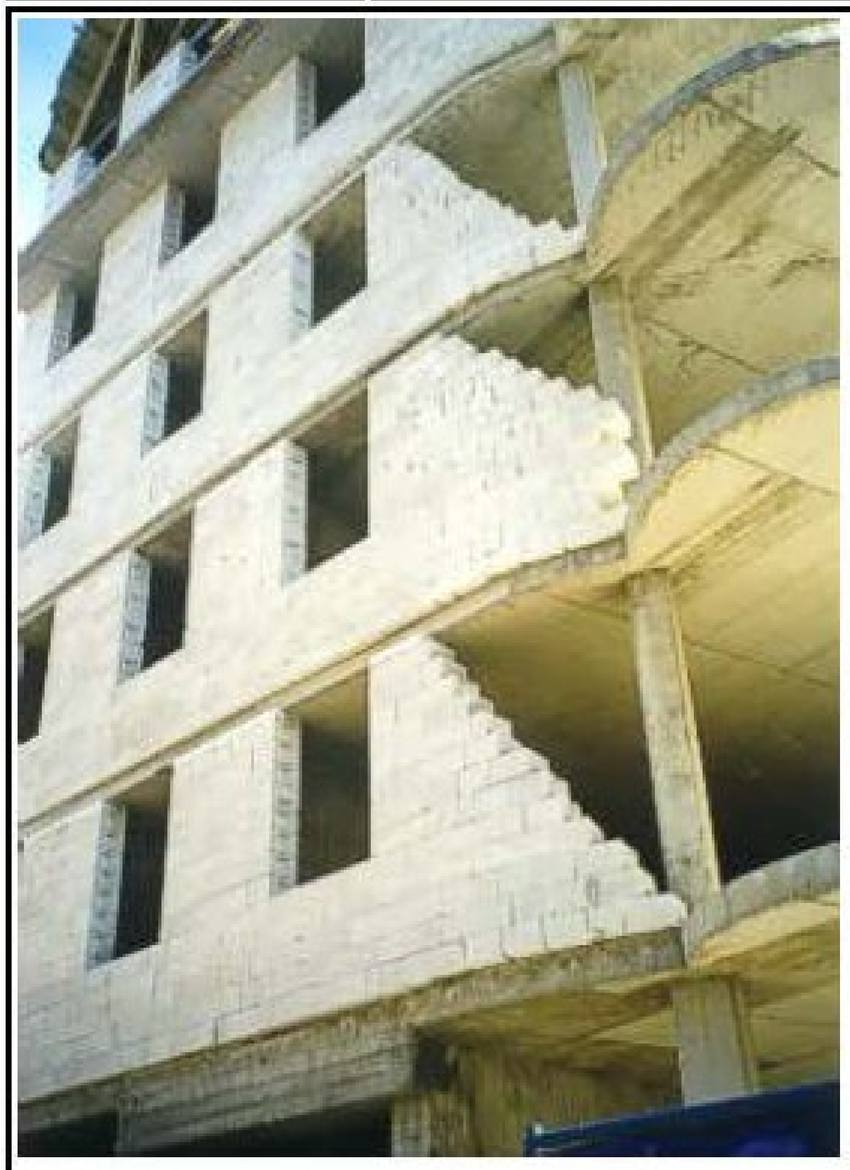
HARDENING PROCESS MODELS OF YOUNG CONCRETE. LITERATURE OVERVIEW

Dr. Tibor Kausay

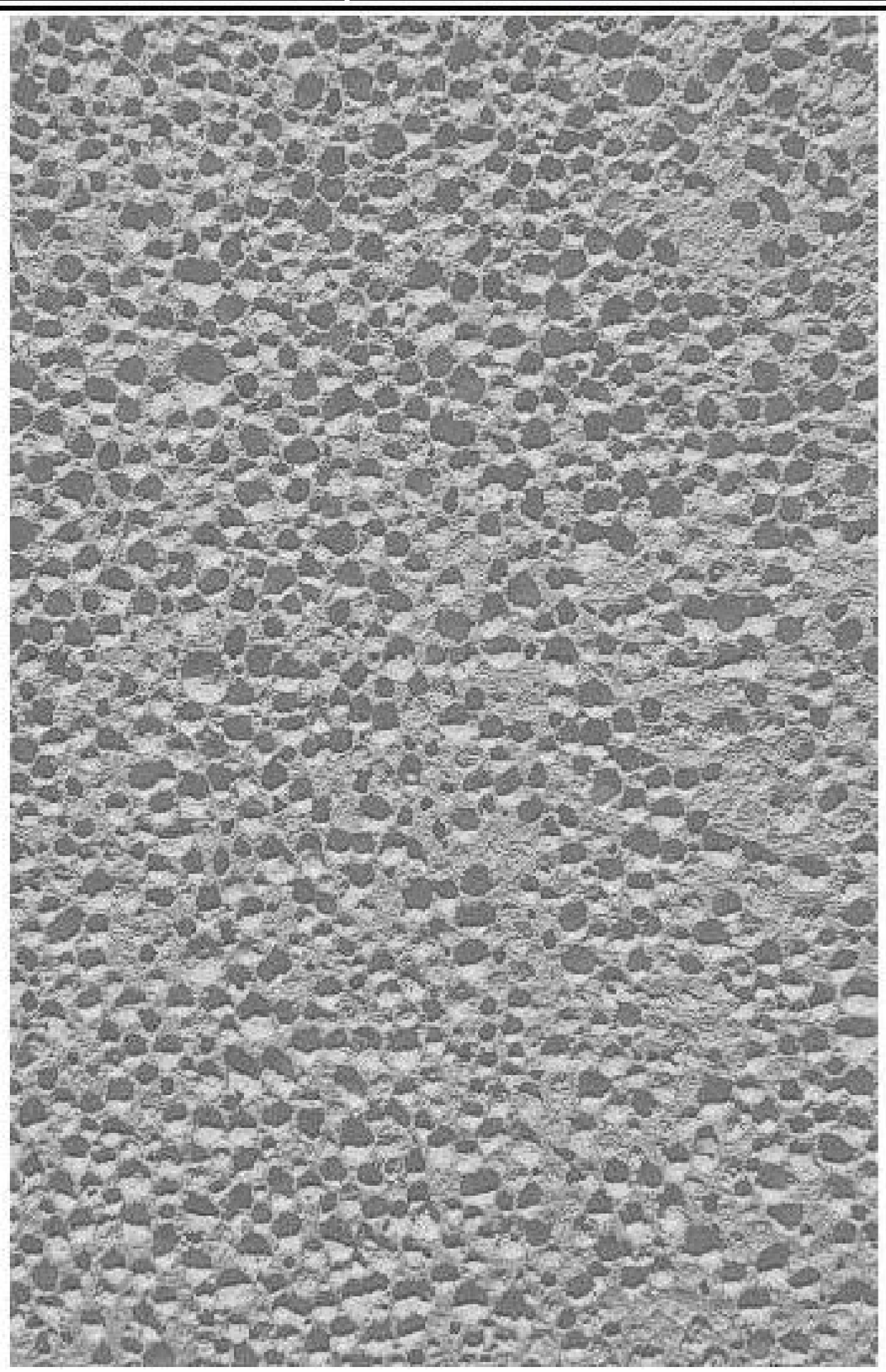
During the preparation of concrete the knowledge of the early compressive strength, the tensile strength or the modulus of elasticity development, might be important from the point of the type of curing, of stripping the structure, of loadability or in some cases of the time of prestressing. Since the hardening process of young concrete is significantly influenced by temperature, it is usually studied as a function of the time and temparature. During the past sixty years several researchers described their experiences by several maturity models, out of which in our paper we would like to overwiew the most basic ones.

Gázbeton, pórusbeton

Németül:	Gasbeton (gázbeton), Porenbeton (pórusbeton)
Angolul:	Gas concrete (gázbeton)
Franciául:	Béton-gaz (gázbeton)



Építkezés homokalapú gázbeton (pórusbeton) falazóelemekkel



A gázbeton szövetszerkezete

Gázbetonnak a sejtesített könnyűbetonok ◆ egyik fajtáját, a gázképzővel előállított sejtbetont ◆ nevezzük. Ma a gázbeton-termékeket üzletpolitikai meggondolásból mind a kereskedelemben, mind a szabványosításban német mintára pórusbetonnak hívják. Alapanyaga az őrölt égetett mészből, őrölt gipszkőből, cementből, pernyéből vagy őrölt kvarchomokból, régebben égetett olajpala-őrleményből, és vízből kevert, megfelelő gázképzőt is tartalmazó finomhabarcs. Gázképzőként ma leggyakrabban alumíniumport vagy -pasztát használnak, amely az őrölt égetett mész beoltódásából keletkező mészhidrát ($Ca(OH)_2$) vizes oldatából hidrogéngázt fejleszt, és a nyers keverékben legfeljebb 2 mm átmérőjű, zárt pórusok sokaságát hozza létre. Az öntőformában sejtesített és előérlelt gázbetontömböt kizsaluzás és termékméretre való felvágás után autoklávolással ◆ szilárdítják. Az autoklávolás ideje 10-12 óra, a telített vízgőz-tér nyomása 8-12 bar, hőmérséklete 170-190 °C, amelynek hatására a gázbetonban - annak szilárdságát adó - kalcium-hidro-szilikát ásványok alakulnak ki. Ennek során tobermorit ($5.CaO{\cdot}3.SiO_2{\cdot}5.H_2O$) kristályok is képződnek, amelyek a természetben (például Uzsabányán) és a cementkőben ◆ is megtalálhatók.

A gázbeton testsűrűsége 400-800 kg/m^3, nyomószilárdsága 2,5-7,5 N/mm^2, hővezetési tényezője 0,12-0,25 W/mK, porozitása a 70 térfogat%-ot, vízfelvétele a 60 tömeg%-ot is elérheti. Nem-éghető építőanyag. Gázbetonból kis testsűrűsége és jó hőszigetelőképessége folytán elsősorban falazóelemeket gyártanak, amelyekből készült falszerkezet törőszilárdsága az elem szilárdsági osztályától és a falazás minőségétől függően 1,6-4,8 N/mm^2. A legalább 700 kg/m^3 testsűrűségű gázbetonból vasalt fal-, tető- és födémpallók, lépcsők, feszített födém-kéregpallók is előállíthatók.

A gázbetont *Dr. Johan Axel Eriksson* svéd építész fejlesztette ki azzal a szándékkal, hogy az épületfát kedvező tulajdonságú, nem éghető és nem korhadó építőanyaggal váltsa ki. Találmányát 1924-ben szabadalmaztatta. Gyártását Ytong ("Yxhult Betong" szóösszetétel rövidítése) néven 1929-ben kezdte el Svédországban az egyébként kőzetek feldolgozására 1878-ban alapított Yxhults Stenhuggeri AB cég, amelynek szakirányú utóda, az Ytong AG. A számos országban gázbetongyárral rendelkező társaság 1983-ban tette át székhelyét Svédországból Münchenbe, és 1992 óta tulajdonosa a gyöngyösvisontai pórusbetongyárnak is. Az Ytongon kívül számos más gázbetongyártási technológia is teret hódított (Hebel, Siporex, Dorstener, Durox, Calsilox, Peja, stb.). Magyarországon 1963-1998 között működött a kazincbarcikai gázbetongyár, amely lényegében lengyel technológiával a kazincbarcikai erőmű pernyéjéből állított elő szürke színű gázbetont. Az egyetlen mai magyarországi gázbetongyár, a gyöngyösvisontai pórusbetongyár Hebel technológia beépítésével 1985-ben létesült, eleinte pernyealapú pórusbetont állított elő, 1990 óta kizárólag homokalapú, fehér színű pórusbeton termékeket gyárt. Saját homok+gipszkő őrlő malommal rendelkezik, az égetett meszet őrölt alakban vásárolja, alumíniumpasztával dolgozik. A gyöngyösvisontai Ytong pórusbetongyár termékei: síkfelületű és megfogóhornyos falazóelemek, zsaluelemek, válaszfalelemek, válaszfal áthidalók, előfalazólapok, hőszigetelt koszorúelemek és hőszigetelőlapok.
A magyar gázbetongyárak 1992-ig az állami Könnyűbeton és Szigetelőanyagipari Vállalat (Kőszig) tulajdonában voltak.

Jelmagyarázat: ◈ A jel előtt álló fogalom a fogalomtár szócikke.

Megjelent a	BETON szakmai havilap	2002. július-augusztus havi számának 25. oldalán

Habbeton, habcement

Németül:	Schaumbeton (habbeton)
Angolul:	Foam-concrete (habbeton)
Franciául:	Béton mousse (habbeton)

Felhasznált irodalom:

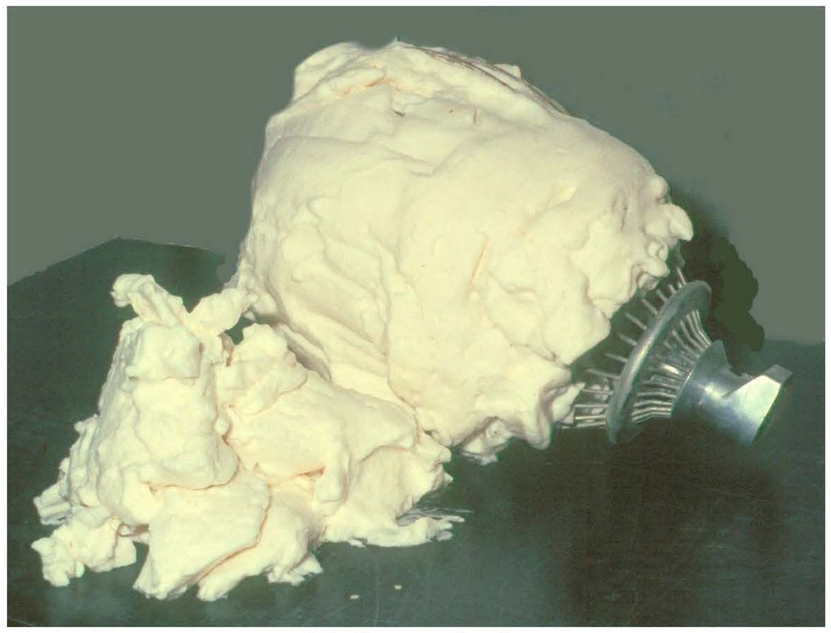
Palotás L. - Balázs Gy.: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 3. kötet. Akadémiai Kiadó. Budapest, 1980.

Laczkovits Z. - Novák Á. - Osztroluczky M.: Bau-Mix habcement alkalmazástechnikai kézikönyv. Kaposvár, 2000.

Lamprecht, H.-O. és mások: Beton Lexikon. Beton-Verlag. Düsseldorf, 1990.

DIN 4164:1951 Gas- und Schaumbeton. Herstellung, Verwendung und Prüfung. Richtlinien. (A szabvány ma is érvényes.)

E-A-B Associates: Concrete Foaming Agent. Altrincham (Anglia), 2002.



Felvert hab

Habbeton

A habbeton a sejtbetonok ❖ egyik fajtája, amelynek legfeljebb 2 mm átmérőjű, zárt sejtekből álló sejtszerkezetét habképzőszerrel állítják elő. A régebbi nevezéktanban a habbeton a habképzővel és cement kötőanyaggal készített sejtbetont, a habszilikát a habképzővel és mész kötőanyaggal készített sejtbetont jelentette. Újabban a habbeton elnevezés szinonimája a habcement, amelynek értelmezése lehet, hogy ennek a könnyű építőanyagnak a kötőanyaga habosított cementkő ❖. Német nyelvterületen a gázbetont ❖ és a habbetont együtt pórusos könnyűbetonnak (Porenleichtbeton) is nevezik, és együtt tárgyalják.

A habbeton könnyű, többnyire folyós, habarcs jellegű (tehát voltaképpen nem beton) anyag, amelynek kötőanyaga cement, adalékanyaga homok, pernye, kohósalak, duzzasztott agyagkavics, polisztirol gyöngy, de készülhet esetenként adalékanyag nélkül is (ilyenkor egyértelmű a habcement elnevezés).

A legelterjedtebb habképzők főhatóanyagai a természetes vagy mesterséges tenzidek (felületaktív anyagok). A habképzők stabilizátort is tartalmaznak, hogy a nagy levegő tartalmú habbeton sejtszerkezetét ❖ a keverés, a bedolgozás és a kötés ideje ❖ alatt is megtartsa. A habot hagyományos, gyorsfordulatú, forgószerszámos habverőgéppel vagy nagy-nyomású habképző célgéppel (aggregátorral) lehet „felverni”, és a keletkező kemény habot a megkevert friss habarcshoz, esetleg cementpéphez kényszerkeverőgépben kell hozzá keverni. Habbetont bizonyos habképzőkkel úgy is lehet gyártani, hogy a habképzőt öntik a gyorsjáratú keverőgépben lévő friss habarcshoz vagy cementpéphez. A keverési időt, - ha a habarcs keverékhez a már felvert habot keverjük, akkor a homogenizálásnak, ha a habarcs keverékbe a habképzőt öntjük, akkor a habképződésnek, - megfelelően meg kell növelni.

A habbeton sajátos konzisztenciája folytán könnyen, sokszor tömörítés nélkül is bedolgozható, transzportbetonként is szállítható, szivattyúzható. Szilárdítása általában szabad levegőn történik, de hőkezeléssel vagy gőzöléssel (8 bar = 0,8 MPa alatti nyomáson) is végezhető.

A habbetonból többnyire természetes szilárdítású, monolit hőszigetelő rétegek készülnek, de készíthetők belőle előregyártott elemek, illetve használható az üreges elemek kitöltő-anyagaként is. Alkalmazzák fagyálló és hőszigetelő kiegyenlítő, feltöltő

rétegként födémeken és lapostetőkön (lejtést adó rétegként is), aljzat rétegként ipari és sport csarnokokban, istállókban, alap és teherhordó rétegként az út-, híd- és egyéb mélyépítésben. A habbeton konzisztenciájánál fogva alkalmas üregek, felhagyott csatornák, pincék, föld alatti tartályok kiöntésére, csövek injektálására. A megszilárdult habbeton terhelés hatására nem tömörödik, ezért utak alatti közműárkok betemetésére is használható. A habbeton tulajdonságai az összetételtől függenek, amelyet az alkalmazási célnak megfelelően kell megválasztani.

A habbeton testsűrűsége ◈ 300 - 600 (1800) kg/m^3, nyomószilárdsága ◈ 0,1 - 5,0 (15,0) N/mm^2, hővezetési tényezője 0,09 - 0,18 (0,65) W/mK, ahol a zárójeles értékek inkább egy könnyített habarcs, mint a szó szoros értelmében vett habbeton felső kategória-határai. A habbeton zsugorodási végértéke ◈ 0,8 - 3,5 mm/m között változik. 28 napos korban a zsugorodás megengedett értéke legfeljebb 0,5 mm/m. A habbetonból (vagy gázbetonból) készített előregyártott elemeket beépíteni csak akkor szabad, ha hátralévő, várható utózsugorodásuk már nem több, mint 0,5 mm/m (DIN 4164:1951). A szabad levegőn szilárdított, laza rakatokba helyezett előregyártott elemek ezt az állapotot két-három havi tárolás után érik el.

Habbetont először Bayer dán mérnök készített 1924-ben, ma szerte a fejlett világban használják, Magyarországon gyártására Kaposvárott, 1989-ben alakult meg a BauMix Kft.

Jelmagyarázat: ◈ A jel előtt álló fogalom a fogalomtár szócikke.

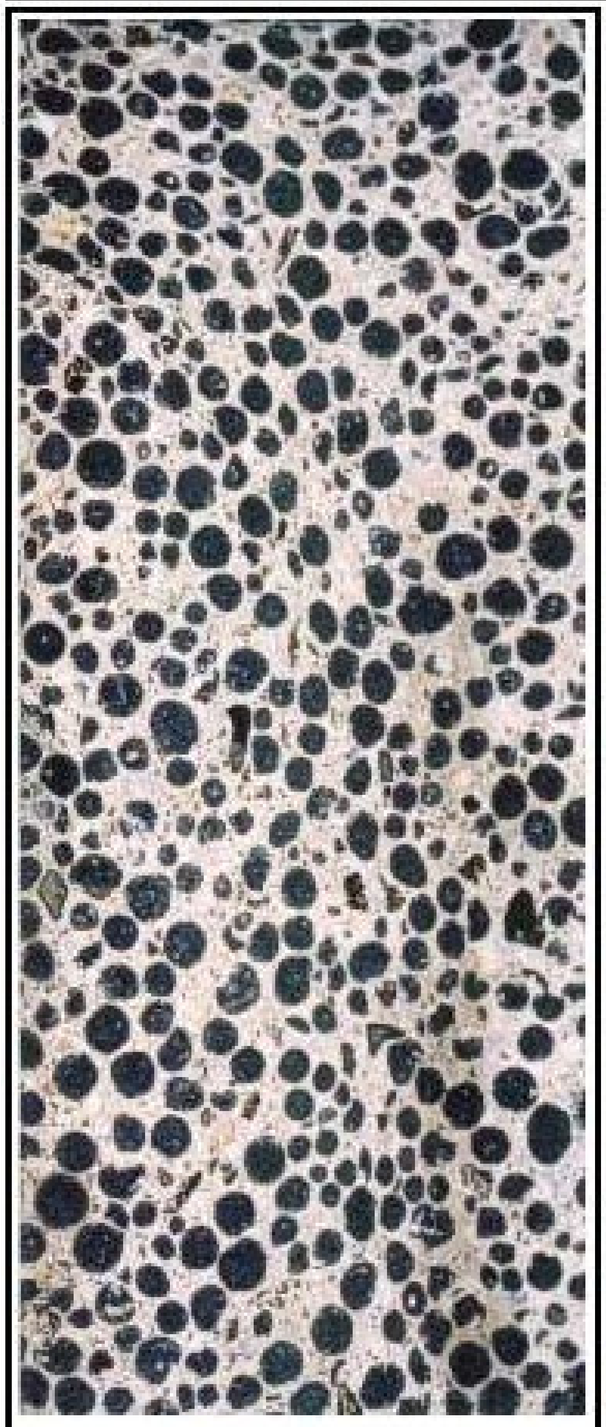
Megjelent a	BETON szakmai havilap	2003. január havi számának 10. oldalán

Könnyűbeton

Németül:	Leichtbeton
Angolul:	Lightweight concrete
Franciául:	Béton léger

Az adalékanyagos könnyűbeton és a közönséges beton törési felületének összehasonlítása:

Duzzasztott perlit beton próbakocka



Duzzasztott agyagkavics beton törési felülete.

Az agyagkavics eltörik, mert szilárdsága a cementkőénél kisebb.

Kavicsbeton törési felülete.

A kavics nem törik el, inkább kifordul, mert szilárdsága a cementkőénél nagyobb.

Jelmagyarázat:

◆ A jel előtt álló fogalom a fogalomtár szócikke.

Könnyűbetonnak hagyományosan (például Magyarországon, Németországban) az adalékanyaggal készített nagy-hézagtérfogatú ◆ és tömör, teherbíró, és/vagy hőszigetelő, 2000 kg/m^3-nél kisebb testsűrűségű ◆ betonokat, és a (cementes) mészhabarcsból, cementpépből, cementhabarcsból sejtesítéssel előállított betonokat ◆ nevezik. Az adalékanyagos, teherbíró (teherhordó) könnyűbetonok testsűrűsége 600-2000 kg/m^3 (MSZ 4719:1982), a sejtesített betonoké legfeljebb 1000 kg/m^3. Az MSZ EN 206-1:2002 európai szabvány könnyűbetonnak csak a folyamatos szemeloszlású adalékanyagos könnyűbetonokat tekinti, amelyek testsűrűsége 800-2000 kg/m^3 közé, nyomószilárdsági osztálya ◆ pedig LC 8/9 - LC 80/88 közé esik.

A könnyűbetonokat többféle szempont szerint lehet rendszerbe foglalni.

Legelterjedtebb az alapanyagok és előállítás szerinti megkülönböztetés, ami a következő ábrával fejezhető ki:

A kinagyításhoz szíveskedjék az ábrára kattintani.

Könnyűbetonok

Adalékanyagos, cement kötőanyagú könnyűbetonok

Egyszemcsés, nagy-hézag-térfogatú, *teherbíró* könnyű-betonok

Természetes adalékanyagú:
- Kavicsbeton
- Zúzottkőbeton
- Duzzasztott agyagkavics beton

Mesterséges adalékanyagú:
- Kohóhabsalak beton
- Pernyekavics beton
- Kazánsalak beton
- Duzzasztott üvegkavics beton

Folyamatos szemeloszlású, tömör, *teherbíró* könnyű-betonok

Természetes adalékanyagú:
- Tufabeton
- Duzzasztott agyagkavics beton

Mesterséges adalékanyagú:
- Zúzott tégla beton
- Kohóhabsalak beton
- Granulált kohósalak beton
- Pernyekavics beton
- Kazánsalak beton
- Agloporit beton
- Duzzasztott üvegkavics beton

Hőszigetelő könnyűbetonok

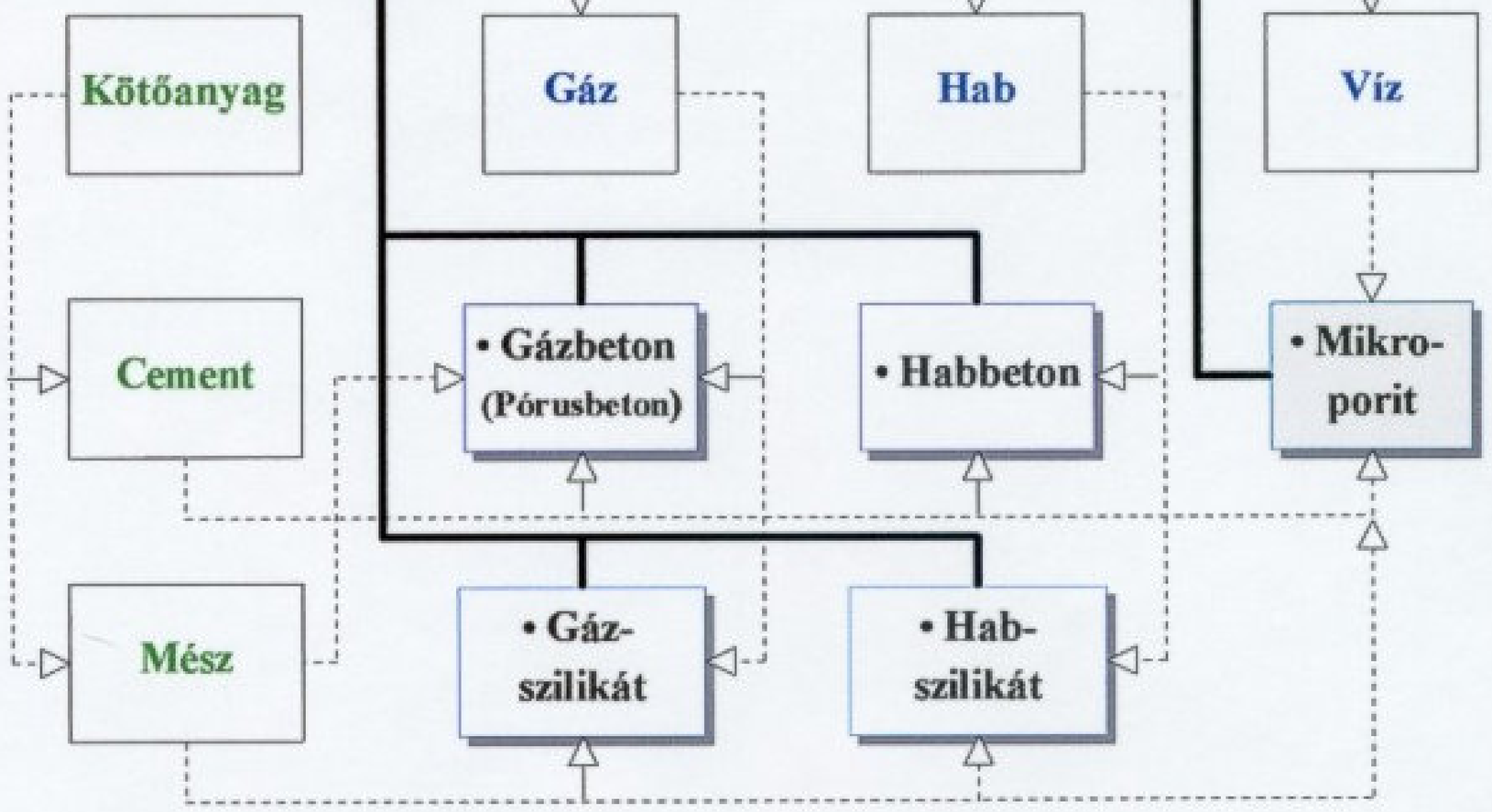
Természetes adalékanyagú:
- Duzzasztott perlit beton
- Fabeton: fagyapot beton, faforgács beton
- Rizshéj beton

Mesterséges adalékanyagú:
- Polisztirol gyöngy beton

Sejtesített könnyűbetonok

Sejtbetonok

Pórusképző anyag



Megjegyzés:

1.) A könnyűbetonok egy része az adalékanyag szemnagyságától, illetve attól függően, hogy kötőanyaga cement vagy mész, voltaképpen nem beton, hanem habarcs (duzzasztott perlit habarcs) vagy pép (habcement);

2.) A folyamatos szemeloszlású adalékanyagos könnyűbetonok kötőanyaga (a tufabeton és a zúzott tégla beton kivételével) mész is lehet;

3.) A gázbetonban és a mikroporitban a cementnek csak a kezdeti szilárdulás során van szerepe, ezek mész-szilikát kötésű rendszerek, és akár gázszilikátnak is tekinthetők;

4.) A sejtesített könnyűbetonok különféle adalékanyagokkal készíthetők, de ezek közül azokat, amelyek a könnyűbeton-gyártás során kémiai átalakuláson mennek át (például a gázbeton vagy a mikroporit gyártási homok vagy pernye), helyesebb nyersanyagnak nevezni.

Az ábra alapján a könnyűbetonok két fő csoportja az *adalékanyagos*, cement (esetleg mész) kötőanyagú könnyűbetonok és a *sejtesített* könnyűbetonok. Az adalékanyagos könnyűbetonok legegyszerűbben a könnyű-adalékanyagok ❖ fogalom-meghatározásaival írhatók le, míg a sejtesített könnyűbetonok közül a két legjelentősebb sejtbeton, a gázbeton ❖ és a habbeton ❖ fogalmát érdemes külön tárgyalni.

A könnyűbetonok alkalmazhatósága fizikai, mechanikai tulajdonságaik függvénye. A következő táblázat a testsűrűség, a nyomószilárdság, a hővezetési tényező alapján a tulajdonságok illetve az alkalmazhatóság szerinti besorolásra mutat példát.

Könnyűbetonok besorolása tulajdonságuk illetve alkalmazhatóságuk szerint**

		Testsűrűség kg/m³	Nyomószilárdság, N/mm²						Hővezetési tényező W/mK
			< 2,5	2,5 - 5,0	5,0 - 7,5	7,5 - 10	10 - 15	15 <	
Teherbíró könnyűbetonok	Hőszigetelő könnyűbetonok	< 200	Polisztirol-gyöngy beton						< 0,06
		200 - 300	Duzzasztott perlit beton						0,06 - 0,09
		300 - 400	Habbeton						0,09 -0,12
		400 - 600	Fa-beton	Gázbeton (pórusbeton)					0,12 - 0,18
	MSZ EN 206-1:2002 szerinti adalékanyagos, teherbíró könnyűbetonok	600 - 800				*	*	*	0,18 - 0,25
		800 - 1100			Kohóhabsalak beton és granulált kohósalak beton				0,25 - 0,38
		1100 - 1400		Egyszemcsés, nagy-hézagtérfogatú könnyűbeton					0,38 - 0,50
		1400 - 1600			Tufabeton és duzzasztott üvegkavics beton			Duzzasztott agyagkavics beton	0,50 - 0,60
		1600 - 1800							0,60 - 0,70
		1800 - 2000					Zúzott tégla beton		0,70 -0,80

Megjegyzés: *Az MSZ 4719:1982 szabvány a 600 - 2000 kg/m³ testsűrűségű adalékanyagos betonokat tekinti teherbíró könnyűbetonnak.

** A könnyűbetonok testsűrűsége, nyomószilárdsága, hővezetési tényezője jelentős mértékben eltérhet a táblázatban szereplő értékektől.

Megjelent a BETON szakmai havilap 2002. október havi számának 3-4. oldalán

A Szilikátipari Tudományos Egyesület
Beton Szakosztálya

a BauMix® Építőipari és Kereskedelmi Kft.

és „Az Építés Fejlődéséért" Alapítvány

támogatásával

KÖNNYŰBETONOK ALKALMAZÁSÁNAK ELMÉLETE ÉS GYAKORLATA: RÉGI ÉS ÚJ MEGOLDÁSOK

címmel

2009. november 24-én,
a MTESZ Budai Konferenciaközpont 700. sz. előadótermében,
a Magyar Mérnöki Kamara és a Magyar Építész Kamara által akkreditált

ankétot rendezett.

Az ankéton elhangzott előadásokat kísérő diaképek
az előadások címére kattintva olvashatók és letölthetők.

MEGNYITÓ. A KÖNNYŰBETON FOGALOMKÖRE
Dr. Kausay Tibor, *az SZTE Betonszakosztály elnöke*

KÖNNYŰBETONOK ALKALMAZÁSÁNAK ELMÉLETE ÉS GYAKORLATA: RÉGI ÉS ÚJ MEGOLDÁSOK

A Szilikátipari Tudományos Egyesület
Beton Szakosztályának ankétja

Budapest, 2009. november 24.

KÖNNYŰBETONOK ALKALMAZÁSÁNAK ELMÉLETE ÉS GYAKORLATA: RÉGI ÉS ÚJ MEGOLDÁSOK

Főtámogató:

BauMix Építőipari és Kereskedelmi Kft.

Támogató:

„Az Építés Fejlődéséért” Alapítvány

KÖNNYŰBETONOK ALKALMAZÁSÁNAK
ELMÉLETE ÉS GYAKORLATA:
RÉGI ÉS ÚJ MEGOLDÁSOK

SZTE ankét, 2009. november 24.

MEGNYITÓ

KÖSZÖNTÉS

A KÖNNYŰBETON FOGALOMKÖRE

Dr. Kausay Tibor

TISZTELT ANKÉT!

ÖRÖMÜNKRE SZOLGÁL, hogy kedves Kollégáinkat köszönthetjük. Tartalmas és jó hangulatú délutánnak nézünk elébe.

KÖSZÖNTÜNK minden Résztvevőt, köszöntjük az ankét Előadóit.

KÖSZÖNJÜK, hogy az Előadók ismereteiket megosztják velünk.

HANGSÚLYOSAN KÖSZÖNJÜK

a BauMix Kft-nek, hogy az ankét megrendezésének anyagi terheit (beleértve a kredit-pont szerzés költségeit is) magára vállalta.

Előadások a könnyű adalékanyaggal készülő könnyűbetonok aktuális hazai kutatási eredményeiről

Az SZTE BETONSZAKOSZTÁLY rendezvénye

2005. május 12.

Megnyitó: dr. Kausay Tibor

SZ·T·E

Négy évvel ezelőtti ankétunk...

A 2005. május 12-i rendezvény előadói a duzzasztott agyagkavics és a duzzasztott üvegkavics betonról tartottak előadást.

Az előadók voltak:

Dr. Józsa Zsuzsanna egy. docens

Nemes Rita doktorandusz (ma Dr., egy. adjunktus)

Fenyvesi Olivér okl. építőmérnök (ma doktorandusz)

BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

Könnyűbetonok

Adalékanyagos, cement kötőanyagú könnyűbetonok

Egyszemcsés, nagy-hézag-térfogatú *teher*- könnyű-betonok

Folyamatos szemeloszlású, *teherbíró* könnyű-betonok

Gázbeton (Pórusbeton)

Hőszigetelő könnyűbetonok

Természetes adalékanyagú:
- **Duzzasztott perlit beton**
- **Fabeton: fagyapot beton, faforgács beton**
- **Rizshéj beton**

Mesterséges adalékanyagú:
- **Polisztirol gyöngy beton**

Póruskép anyag

Kötőanyag

Cement

Mész

Gáz

Gáz-szilikát

Hab

Hab-szilikát

Víz

Mikro-porit

Habcement

Mai anketünk témaköre a „nagyon könnyű betonok”

Könnyűbetonok

Adalékanyagos, cement kötőanyagú könnyűbetonok

Egyszemcsés, nagy-hézag-térfogatú, *teherbíró* könnyű-betonok

Természetes adalékanyagú:
- Kavicsbeton
- Zúzottkőbeton
- Duzzasztott agyagkavics beton

Mesterséges adalékanyagú:
- Kohóhabsalak beton
- Pernyekavics beton
- Kazánsalak beton
- Duzzasztott üvegkavics beton

Folyamatos szemeloszlású, tömör, *teherbíró* könnyű-betonok

Természetes adalékanyagú:
- Tufabeton
- Duzzasztott agyagkavics beton

Mesterséges adalékanyagú:
- Zúzott tégla beton
- Kohóhabsalak beton
- Granulált kohósalak beton
- Pernyekavics beton
- Kazánsalak beton
- Agloporit beton
- Duzzasztott üvegkavics beton

Hőszigetelő könnyűbetonok

Sejtesített könnyűbetonok

Sejtbetonok

Kötőanyag
- Cement
- Mész

Gáz
- Gázbeton (Pórusbeton)
- Gáz-szilikát

Hab
- Habcement
- Hab-szilikát

Pórusképző anyag

Víz
- Mikro-porit

A könnyűbetonok testsűrűsége:

≤ 2000 kg/m^3

a nagyon könnyűeké: < 800 kg/m^3

Könnyűbetonok besorolása tulajdonságuk, illetve alkalmazhatóságuk szerint**

		Testsűrűség kg/m³	Nyomószilárdság, N/mm²						Hővezetési tényező W/mK
			≤ 2,5	2,5 - 5,0	5,0 - 7,5	7,5 - 10	10 - 15	15 ≤	
	Hőszigetelő könnyűbetonok	≤ 200	Polisztirol-gyöngy beton						≤ 0,06
		200 - 300	Duzzasztott perlit beton						0,06 - 0,09
		300 - 400	Habcement						0,09 -0,12
		400 - 600	Fa-beton	Gázbeton (pórusbeton)					0,12 - 0,18
		600 - 800				*	*	*	0,18 - 0,25
Teherbíró könnyűbetonok	*MSZ EN 206-1:2002 szerinti adalékanyagos, teherbíró könnyűbetonok*	800 - 1100			Kohóhabsalak beton és granulált kohósalak beton				0,25 - 0,38
		1100 - 1400		Egyszemcsés, nagy-hézagtérfogatú könnyűbeton					0,38 - 0,50
		1400 - 1600			Tufabeton és duzzasztott üveghavics beton			Duzzasztott agyaghavics beton	0,50 - 0,60
		1600 - 1800							0,60 - 0,70
		1800 - 2000					Zúzott tégla beton		0,70 -0,80

Megjegyzés: *Az MSZ 4719:1982 szabvány a 600 - 2000 kg/m³ testsűrűségű adalékanyagos betonokat tekinti teherbíró könnyűbetonnak.

** A könnyűbetonok testsűrűsége, nyomószilárdsága, hővezetési tényezője jelentős mértékben eltérhet a táblázatban szereplő értékektől.

Mai ankétunk témaköre

A "nagyon könnyű" betonok

Könnyűbetonok besorolása tulajdonságuk, illetve alkalmazhatóságuk szerint

						Teherbíró könnyűbetonok
		Hőszigetelő könnyűbetonok				MSZ EN szerinti ad teherbíró k
	Testsűrűség kg/m³	Nyomószilárdság, N/mm²				
		< 2,5	2,5 - 5,0	5,0 - 7,5	7,5 - 10	10 - 15
Hő-szigetelő könnyű-betonok	< 200	Polisztirol-gyöngy beton				
	200 - 300	Duzzasztott perlit beton				
	300 - 400	Habcement				
	400 - 600			Habbeton		
	600 - 800					*
Teher-bíró könnyű-betonok	MSZ EN 206-1:2002 szerinti adalék-anyagos, teherbíró könnyű-	800 - 1100			Kohóhabsalak beton és granulált kohósalak bet	
		1100 - 1400		Egyszemcsés, nagy-hézagtó fogatú könnyűbeto		
		1400 - 1600			Tufabeton és duzzasztott üvegkavics beton	
		1600 - 1800				

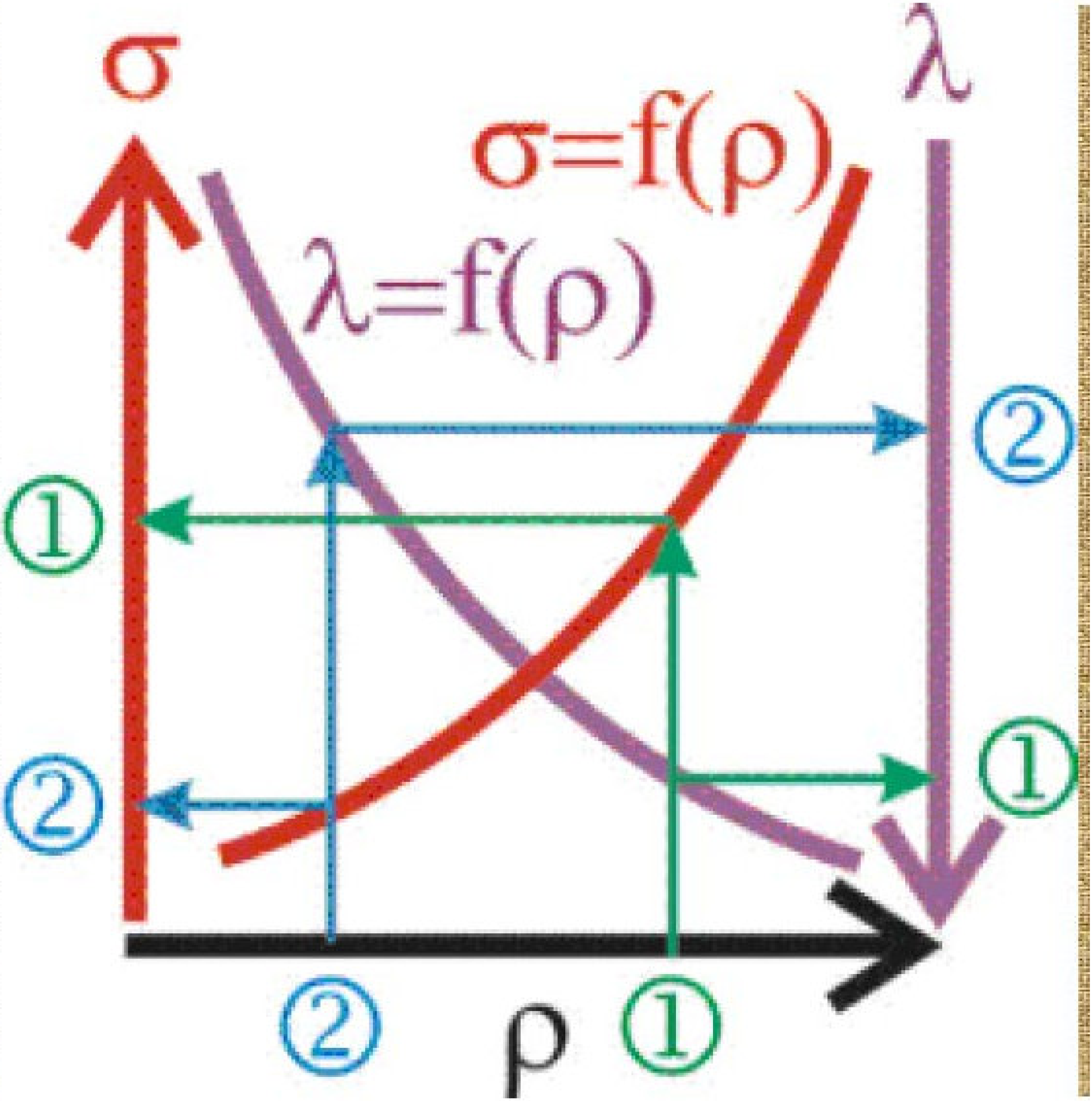
Könnyűbetonok besorolása tulajdonságuk, illetve alkalmazhatóságuk szerint**

		Hőszigetelő könnyűbetonok		Teherbíró könnyűbetonok				
				MSZ EN 206-1:2002 szerinti adalékanyagos teherbíró könnyűbetonok				
	Testsűrűség kg/m³	Nyomószilárdság, N/mm²						Hővezetési tényező W/mK
		≤ 2,5	2,5 - 5,0	5,0 - 7,5	7,5 - 10	10 - 15	15 ≤	
Hőszigetelő könnyűbetonok	≤ 200	Polisztirolgyöngy beton						≤ 0,06
	200 - 300	Duzzasztott perlit beton						0,06 - 0,09
	300 - 400	Habcement						0,09 -0,12
	400 - 600	Habbeton						0,12 - 0,18
	600 - 800					*	*	0,18 - 0,25
Teherbíró könnyűbetonok	MSZ EN 206-1:2002 szerinti adalékanyagos, teherbíró könnyűbetonok 800 - 1100			Kohóhabsalak beton és granulált kohósalak beton				0,25 - 0,38
	1100 - 1400		Egyszemcsés, nagy-hézagtartalmú könnyűbeton					0,38 - 0,50
	1400 - 1600			Tufabeton és duzzasztott üvegkavics beton			Duzzasztott agyagkavics beton	0,50 - 0,60
	1600 - 1800							0,60 - 0,70
	1800 - 2000					Zúzott tégla beton		0,70 -0,80

Megjegyzés: *Az MSZ 4719:1982 szabvány a 600 - 2000 kg/m³ testsűrűségű adalékanyagos betonokat tekinti teherbíró könnyűbetonnak.

** A könnyűbetonok testsűrűsége, nyomószilárdsága, hővezetési tényezője jelentős mértékben eltérhet a táblázatban szereplő értékektől.

Mai anketünk témaköre
A "nagyon könnyű" betonok


σ
λ
σ=f(ρ)
λ=f(ρ)
①
②
②
①
②
ρ
①

§

Az Európai Közösségek Tanácsának 1988. december 21-én kiadott 89/106. EGK jelű irányelve (direktívája → törvénye) a tagállamok építési termékekre vonatkozó törvényeinek, rendeleteinek és államigazgatási határozatainak összehangolásáról

...

I. FÜGGELÉK

Alapvető követelmények ▶

FÜGGELÉK

Alapvető követelmények

A termékeknek alkalmasnak kell lenniük olyan építmények megépítésére, amelyek a szokásos karbantartás mellett, a használati élettartam alatt megfelelnek a következő alapvető követelményeknek:

1. **Mechanikai ellenállás és szilárdság (+alakváltozás.)**
2. **Tűzbiztonság (építmény állékonyság, életvédelem)**
3. **Higiénia, egészség- és környezetvédelem**
4. **Üzembiztonság (baleseti veszélyek megelőzése)**
5. **Zajvédelem (egészség, alvás, pihenés, munka)**
6. **Energiatakarékosság és hőszigetelés**

Az Európai Unió a 2002/91 direktívában kötelezően előírta a tagállamok részére, hogy az épületek energia-teljesítményéről saját szabályozást hozzanak létre, és azt 2006. január 4-ig léptessék is életbe.

Magyarországon megjelent 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról, amelynek rendelkezéseit a 2006. szeptember 1-je után indult építési engedélyezési eljárásokban kell alkalmazni.

E rendelet szerint *a hőátbocsátási tényező megengedett legnagyobb értéke* például

- **külső falak esetén U = 0,45 (W/m^{2}K),**
- **padlás födémek esetén U = 0,30 (W/m^{2}K),**
- **lapos tetők esetén U = 0,25 (W/m^{2}K).**

Hőátbocsátási tényező

Az *U* a hőátbocsátási tényező (korábbi jele *k* betű volt) összefüggése:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{belépő}} + \sum \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{kilépő}}} = \frac{1}{R_\alpha + \Sigma R_i} \qquad \left[W / m^2 K\right]$$

ahol (R_a + ΣR_i) a hőátadási és hővezetési ellenállások összege, más néven a *hőátbocsátási ellenállás*.

Az $R = d/\lambda$ hányadost [m^2K/W] *hővezetési ellenállásnak* nevezzük.

A *λ hővezetési tényező* [W/mK] **anyagjellemző.**

Könnyűbetonok besorolása tulajdonságuk, illetve alkalmazhatóságuk szerint**

	Testsűrűség kg/m³	Hőszigetelő könnyűbetonok: Nyomószilárdság, N/mm²		Teherbíró könnyűbetonok: Nyomószilárdság, N/mm²				Hővezetési tényező W/mK
		≤ 2,5	2,5 - 5,0	5,0 - 7,5	7,5 - 10	10 - 15	15 ≤	
Hő-szigetelő könnyű-betonok	≤ 200	Polisztirol-gyöngy beton						≤ 0,06
	200 - 300	Duzzasztott perlit beton						0,06 - 0,09
	300 - 400	Habcement						0,09 -0,12
	400 - 600	Habbeton						0,12 - 0,18
	600 - 800					*	*	0,18 - 0,25
Teher-bíró könnyű-betonok	*MSZ EN 206-1:2002 szerinti adalékanyagos, teherbíró könnyű-betonok* 800 - 1100			Kohósalak beton és granulált kohósalak beton				0,25 - 0,38
	1100 - 1400			Egyszemcsés, nagy-hézagtartalmú könnyűbeton				0,38 - 0,50
	1400 - 1600			Tufabeton és duzzasztott üvegkavics beton			Duzzasztott agyagkavics beton	0,50 - 0,60
	1600 - 1800							0,60 - 0,70
	1800 - 2000					Zúzott tégla beton		0,70 -0,80

Megjegyzés: *Az MSZ 4719:1982 szabvány a 600 - 2000 kg/m³ testsűrűségű adalékanyagos betonokat tekinti teherbíró könnyűbetonnak.

** A könnyűbetonok testsűrűsége, nyomószilárdsága, hővezetési tényezője jelentős mértékben eltérhet a táblázatban szereplő értékektől.

Mai anketünk témaköre
A „nagyon könnyű” betonok

BauMix®
ÉPÍTŐIPARI ÉS KERESKEDELMI KFT.

Száraz polisztirolbeton

Szemhalmaz, cement bevonatú

A polisztirolbeton adalékanyaga
a *duzzasztott polisztirol gyöngy*

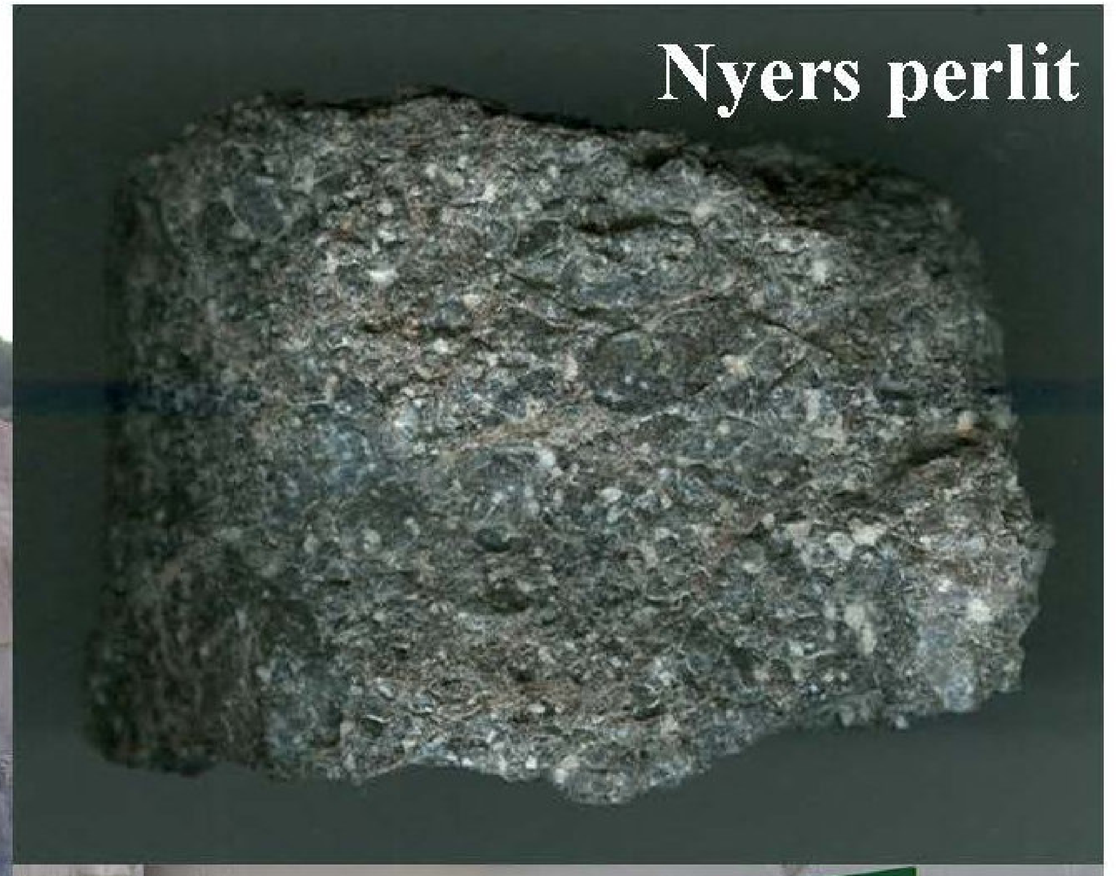
Anhidrit esztrich

Lépéshang- és hőszigetelés

A polisztirolbeton adalékanyaga a *duzzasztott polisztirol gyöngy*, amelynek alapanyaga a kőolajból előállított, finomszemű, polimerizált, hajtógázzal adagolt sztirol, amely habosítása során eredeti térfogatának 20-50-szeresére duzzad.

Az így létrejött gyöngy cellaszerkezete zárt, szemnagysága 0,5-4,0 mm, halmazsűrűsége 15-35 kg/m^3. Magyarországon is gyártják.

Pálháza, perlitbánya



<u>A perlitbeton adalékanyaga</u> <u>*a duzzasztott perlit.*</u> A perlit (latin eredetű szó, jelentése: gyöngy) a riolit (kiömlési, azaz effuzív) kőzet üveges módosulata, nagy-szilárdságú, tömött kőanyag, amely kötött vizet tartalmaz.

Magyarország jelentős perlitkészlettel rendelkezik; 1957 óta Pálházán bányásszák, több helyen duzzasztják.

A nyers perlitet megtörik, megszárítják, több fokozatban osztályozzák, körfolyamatban 1,6 mm alá őrlik, és hirtelen, általában 950-1100 °C hőmérsékleten duzzasztják.

A duzzasztás hatására a nyers perlitőrleményből kis-testsűrűségű, cella szerkezetű gömbök keletkeznek.

A duzzasztott szemek legnagyobb szemnagysága 5 mm, általában 0/0,5, 0/1, 0/2, 1/5 mm szemnagyságú frakciókra osztályozzák.

A perlitbeton adalékanyaga *a duzzasztott perlit.* A perlit (latin eredetű szó, jelentése: gyöngy) a riolit (l...lési, azaz effuzív) kőzet üveges módosulata, nag...gú, tömött kőanyag, amely kötött vizet tar...

Magyarország jelentős perlitkész..., 1957 óta Pálházán bányásszák, töb...

A nyers perlitet megtö... több fokozatban osztályozzák, kö... 1,6 mm alá őrlik, és hirtelen ...1100 °C hőmérsékleten duzzasz...

A ...ara a nyers perlitőrleményből kis-te... ...ila szerkezetű gömbök keletkeznek.

A d...ott szemek legnagyobb szemnagysága 5 mm, általában 0/0,5, 0/1, 0/2, 1/5 mm szemnagyságú frakciókra osztályozzák.

A perlitbetonnal részletesen nem foglalkozunk, mert azt a BauMix Kft. nem gyártja.

mai ankétunkon rész...

'02 01 25

Habcement és habbeton alkalmazása

Hőszigetelés, lejtésképzés

BauMix®
ÉPÍTŐIPARI ÉS KERESKEDELMI KFT.

Injektálás

Tömedékelés

A habcement a sejtbetonok egyik fajtája, amelynek legfeljebb 2 mm átmérőjű, zárt sejtekből álló sejtszerkezetét habképzőszerrel állítják elő. Kötőanyaga a cement.

A legelterjedtebb habképzők főhatóanyagai a természetes vagy mesterséges tenzidek (felületaktív anyagok).

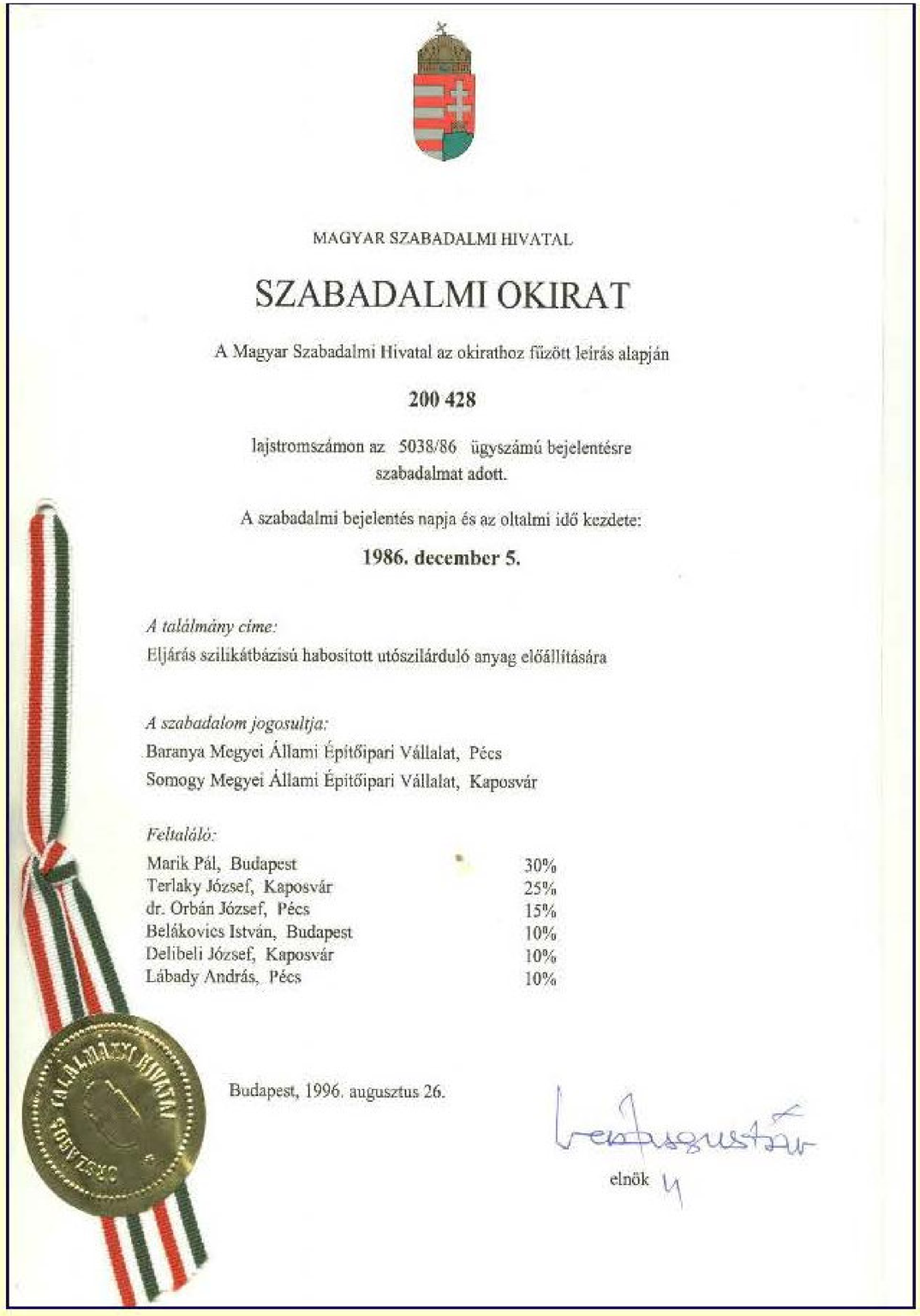
Habbetonnak nevezzük, ha adalékanyagot (például homok, pernye, kohósalak, duzzasztott agyagkavics, polisztirol gyöngy) is tartalmaz.

A habcement és a habbeton sajátos konzisztenciája folytán könnyen, sokszor tömörítés nélkül is bedolgozható, transzportbetonként is szállítható, szivattyúzható. Általában szabad levegőn szilárdítják.

A Baumix Kft-t vegyipari és építőipari szakemberek alapították 1989-ben, Kaposváron a könnyűbetonok egy fajtája, a habcement szabadalom hasznosítására.

A nyugati építőipari trendekkel együtt haladva itthon is megszülettek a polisztirol alapú könnyűbetonok, melynek a Baumix Kft. az évek folyamán szakértőjévé vált.

A Baumix Kft. ma olyan saját fejlesztésű építőipari termékekkel és technológiákkal foglalkozik, melyek az épületszerkezetek hővédelmét, hosszútávon pedig az épített környezet energiafelhasználásának csökkentését szolgálják.



MAGYAR SZABADALMI HIVATAL

SZABADALMI OKIRAT

A Magyar Szabadalmi Hivatal az okirathoz fűzött leírás alapján

200 428

lajstromszámon az 5038/86 ügyszámú bejelentésre szabadalmat adott.

A szabadalmi bejelentés napja és az oltalmi idő kezdete:

1986. december 5.

A találmány címe:
Eljárás szilikátbázisú habosított utószilárduló anyag előállítására

A szabadalom jogosultja:
Baranya Megyei Állami Építőipari Vállalat, Pécs
Somogy Megyei Állami Építőipari Vállalat, Kaposvár

Feltaláló:

Marik Pál, Budapest	30%
Terlaky József, Kaposvár	25%
dr. Orbán József, Pécs	15%
Belákovics István, Budapest	10%
Delibeli József, Kaposvár	10%
Lábady András, Pécs	10%

Budapest, 1996. augusztus 26.

elnök

BauMix Kft.

A **BauMix Kft.** TEVÉKENYSÉGI KÖRE

Tetők hőszigetelése és lejtésképzése
Födémek hang- és hőszigetelése
Injektálás
Könnyűbetonos kivitelezés
Homlokzatszigetelés
Zsákos kiszerelésű könnyűbetonok gyártása
EPS lemezek gyártása
Hulladék gazdálkodás
Technológia és termékfejlesztés (ÖKOCELL)

ALKALMAZOTT TECHNOLÓGIÁK

BauMix Habcement
ÖKOCELL könnyűbetonok
ÖKOCELL Csend
BauMix Anhidrit Esztrich (Transmix)

A BAUMIX KFT.
KÖZPONTJA ÉS TELEPHELYEI

KAPOSVÁR KÖZPONTI IRODA
7400 Kaposvár, Kanizsai u. 56.

KAPOSVÁRI IGAZGATÓSÁG
7400 Kaposvár, Kanizsai u. 56.

BUDAPEST ÉPÍTÉSI IGAZGATÓSÁG
1088 Budapest, József krt. 30-32.

ERCSI KERESKEDELMI IRODA
2451 Ercsi, Cukorgyári út
(volt Cukorgyár)

Budapesti Területi Igazgatóság	Kaposvári Területi Igazgatóság	Ercsi Területi Igazgatóság
Önterülő anhidrit esztrich kivitelezés	Ökocell zsákos drazsír, Mix gyártása	Ökocell EPS gyártás
Ökocell könnyűbeton kivitelezés	Ökocell gyöngy alapanyag gyártása	Ökocell gyöngy alapanyag gyártása
Tető hőszigetelés Tető lejtésképzés	Panelházak hőszigetelése, felújítása	Ökocell drazsír gyártása
Ökocell Csend kivitelezés	Vízszigetelés kiviteletése	Hulladék feldolgozás
Injektálás, tömedékelés kivitelezése	Hőszigetelt házak tervezése, építése	Telephely üzemeltetés
Falak hőszigetelése	Pályázatok írása	Vámudvar
Közbenső födémek kialakítása	Tervezés, képzés, oktatás	Laboratórium
BauMix® ÉPÍTŐIPARI ÉS KERESKEDELMI KFT.	Laboratórium	Ökocell Therm és Csend gyártása

Budapesti Területi Igazgatóság	Kaposvári Területi Igazgatóság	Ercsi Területi Igazgatóság
Önterülő anhidrit esztrich **kivitelezés**	Ökocell zsákos drazsír, Mix **gyártása**	Ökocell [illegible]
Ökocell könnyűbeton **kivitelezés**	Ökocell gyöngy alapanyag **gyártása**	[illegible] alapanyag
Tető **hőszigetelés** Tető **lejtésképzés**	Panelházak hőszig[illegible] **felújítása**	[illegible]ocell drazsír **gyártása**
Ökocell Csend **kivitelezés**	Vízszig[illegible]	Hulladék **feldolgozás**
Injektálás, tömedékelés **kivitelezése**	[illegible]k tervezése,	Telephely üzemeltetés
Falak h[illegible]	[illegible]nyázatok írása	Vámudvar
Köz[illegible] **kialak**[illegible]	Tervezés, képzés, oktatás	**Laboratórium**
BauMix ÉPÍTŐIPARI ÉS KERESKEDELMI KFT.	**Laboratórium**	Ökocell Therm és Csend **gyártása**

A Baumix Kft. anyagait a kezdetektől fogva az ÉMI Nonprofit Kft. vizsgálta, minősítette.

MAI PROGRAMUNK

SÓLYOMI Péter (ÉMI Nonprofit Kft.):
Könnyűbetonok épületfizikai tulajdonságai

PARLAGI Gáspárné (ÉMI Nonprofit Kft.):

DR. CSOTT Róbert (ÉMI Nonprofit Kft.):
Könnyűbetonok speciális alkalmazásai

DR. KOVÁCS Károly (ÉMI Nonprofit Kft.): Hozzászólás

SOMFALVI László (Baumix Kft.): Tetők hőszigetelése és lejtésképzése

CZAKÓ László (Baumix Kft.): Könnyűbetonok a padozati rétegrendekben

SÁNTHA Béla (Baumix Kft.): Habcement a közmű- és mélyépítésben

TERLAKY József (Baumix Kft.): Könnyűbeton külföldön. Következtetések

KÖSZÖNET NYILVÁNÍTÁS

Az ankét résztvevőinek nevében köszönetet mondunk a szervezés bonyolítóinak:

BOROS Nikolettnek (BauMix Kft.)

TÓTH-ASZTALOS Rékának (SZTE)

DR. ANTAL Józsefnénak (SZTE)

Köszönöm a figyelmüket.

Jó munkát kívánok…